

**METHANGÄRUNG VON KLÄRSCHLAMM
UND ANDEREN KOMPLEXEN SUBSTRATEN
BEI MESOPHILEN UND THERMOPHILEN TEMPERATUREN**

*Dase München
1984*

Uwe Temper



Methangärung von Klärschlamm und anderen komplexen Substraten
bei mesophilen und thermophilen Temperaturen

Dissertation
der Fakultät für Biologie
der Ludwig-Maximilians-Universität
München

vorgelegt
von
Uwe Temper
aus
Kempten/Allg.

Dezember 1983

101	Verfahrenstechnik
102	Verfahrenstechnik
103	Verfahrenstechnik
104	Verfahrenstechnik
105	Verfahrenstechnik
106	Verfahrenstechnik
107	Verfahrenstechnik
108	Verfahrenstechnik
109	Verfahrenstechnik
110	Verfahrenstechnik
111	Verfahrenstechnik
112	Verfahrenstechnik
113	Verfahrenstechnik
114	Verfahrenstechnik
115	Verfahrenstechnik
116	Verfahrenstechnik
117	Verfahrenstechnik
118	Verfahrenstechnik
119	Verfahrenstechnik
120	Verfahrenstechnik

1. Berichterstatter: Prof. Dr. O. Kandler
2. Berichterstatter: Dr. rer. nat. habil. R. Hensel

Tag der mündlichen Prüfung: 29. Februar 1984

Verwendete Abkürzungen

ADH	Alkoholdehydrogenase
ATCC	American Type Culture Collection
BSB ₅	Biologischer Sauerstoffbedarf bei einer Zehrerungsdauer von 5 Tagen
GR	Glührückstand
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
GV	Glühverlust
E.	Escherichia
EGW	Einwohnergleichwert
HD	Hefe - Dextrose
LDH	Lactatdehydrogenase
NAD	Nicotinamidadenindinucleotid
oTS	organische Trockensubstanz
RG	Reaktionsgeschwindigkeit
TS	Trockensubstanz

I n h a l t s v e r z e i c h n i s

	Seite
I EINLEITUNG	1
II MATERIAL UND METHODEN	7
1. Versuchsaufbau	7
2. Fermentationssubstrate	9
3. Temperaturadaptation der Mikroorganismen	9
4. Analysen	12
4.1. TS- und oTS-Bestimmung	12
4.2. CSB-Bestimmung	12
4.3. BSB ₅ -Bestimmung	14
4.4. Fettbestimmung	14
4.5. Stickstoff-Bestimmung	15
4.5.1. Ammonium-Stickstoff	15
4.5.2. Organisch gebundener Stickstoff	15
4.6. Bestimmung der organischen Säuren	16
4.6.1. Flüchtige organische Säuren	16
4.6.2. Nicht-flüchtige organische Säuren	17
4.7. Enzymatische Bestimmungen	17
4.7.1. Milchsäurebestimmung	17
4.7.2. Äthanolbestimmung	18
4.8. Bestimmung der Gase	18
5. Manometrische Gaswechsellmessungen	19
6. Nährmedien	19
6.1. Hefe-Dextrose (HD)-Medium	19
6.2. Endo-Agar	20
7. Mikroskopie	20
8. Berechnungen	20
8.1. Berechnung des NH_3 -Anteils am Gesamt- $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ -Stickstoff	20
8.2. Berechnung des Proteingehaltes	22
8.3. Ermittlung der Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten k	22

	Seite
III ERGEBNISSE	24
A. Fermentationsleistungen bei meso- und thermo- philen Temperaturen	24
1. Kommunaler Klärschlamm	24
1.1. Gasproduktion	24
1.2. Gaszusammensetzung	25
1.3. Kinetik der Gasproduktion	30
1.4. Abbau der organischen Substanz	33
1.5. Organische Säuren	42
1.6. pH-Wert	48
2. Kartoffelschlempe und Schweinegülle	49
3. Diskussion	57
B. Gärversuche mit zwei hintereinandergeschalteten Fermentern	65
C. Einfluß der Rührintensität auf die Fermentations- leistung	67
D. Auswirkungen von Stoßbelastungen auf die Fermentation	72
E. Auswirkung von Substratzufuhr-Unterbrechungen auf die Fermentation	78
F. Stabilität des Fermentationsprozesses gegenüber Temperaturschwankungen	80
G. Physiologische Aktivität von Faulschlämmen unterschiedlich stark belasteter Klärschlamm- Fermenter	86
H. Geruch, Lagerfähigkeit und Entwässerungs- eigenschaften des fermentierten Klärschlammes	90
1. Geruch und Lagerung des fermentierten Schlammes	91
2. Entwässerbarkeit des fermentierten Klärschlammes	95
I. Hygienisierungseffekt bei mesophilen und thermo- philen Temperaturen	104

		Seite
IV	SCHLUSSBEMERKUNG	112
V	ZUSAMMENFASSUNG	113
VI	LITERATURVERZEICHNIS	116

I. EINLEITUNG

Seit Beginn der auf eine rund hundertjährige Geschichte zurückblickenden modernen Abwasserklärtechnik wird die anaerobe Schlammfäulung vornehmlich als Stabilisierungsverfahren angesehen, durch das der frische Klärschlamm von den darin enthaltenen faulfähigen Stoffen befreit wird und als Folge davon bei der anschließenden Lagerung zu keinen Geruchsbelästigungen mehr führt. Bei nach wie vor gleicher Zielsetzung wurden jedoch in den letzten Jahrzehnten, bedingt durch zunehmenden Anschluß von Haushaltungen und Gewerbebetrieben an die kommunale Abwasserbeseitigung und unter dem Druck ständig wachsender Investitions- und Betriebskosten, Modifikationen an der Prozeßführung vorgenommen.

Im Gegensatz zu den Anfangszeiten der Faultechnik, wo Wert auf einen möglichst vollständigen Abbau der organischen Feststoffe bis hin zur praktischen Faulgrenze angestrebt wurde, ist das Ziel derzeitiger Klärtechnik lediglich die Ausfäulung bis zu einem Grad, bei dem der Schlamm bereits gut entwässerbar und der leicht abbaubare Teil der organischen Stoffe weitgehend zersetzt ist. Dieser, als technische Faulgrenze bezeichnete Stabilisierungsgrad ist bei kommunalen Klärschlämmen dann erreicht, wenn etwa 50 % der organischen Substanz abgebaut sind (vgl. Roediger, 1967).

Ein weiterer Unterschied zu den Anfängen der modernen Klärtechnik besteht in der mittlerweile eingeführten Faulraumheizung. Durch die Erwärmung des Schlammes auf Temperaturen zwischen 25°C und 35°C konnte eine starke Intensivierung der Faulvorgänge und damit eine beträchtliche Steigerung der Abbauraten erreicht werden (Sierp, 1924; Imhoff, 1927; Hatfield et al., 1928). Eine Zunahme der Abbaugeschwindigkeit wurde ebenfalls durch die Einführung von Schlammumwälzsystemen erreicht, vor allem bedingt durch die Verhinderung der Schwimmdeckenbildung und die Vermeidung von Temperaturgradienten im Faulraum (Bach, 1925; Prüß, 1927; Müller, 1936).

Da wegen des größeren Stoffumsatzes eine Reduzierung der

Schlammaufenthaltszeit in den Faultürmen ermöglicht wurde, führten alle diese Maßnahmen zu einer Verringerung des Faulraumvolumens und damit zu einer Senkung der Investitionskosten. Trotzdem wurde immer wieder nach Möglichkeiten gesucht, durch entsprechende Prozeßführung eine weitere Steigerung der Abbauraten zu erreichen.

Basierend auf der Vorstellung, die Geschwindigkeit biologischer Prozesse nehme mit steigender Temperatur zu, fand der Gedanke einer Schlammbehandlung bei thermophilen Temperaturen zwischen 45°C und 60°C bereits relativ früh Beachtung (Sierp, 1924 u. 1931; Heukelekian, 1930; Imhoff, 1936). Die zahlreichen, im Laufe der folgenden Jahrzehnte zu diesem Thema durchgeführten Versuche brachten jedoch nicht die erwünschten eindeutigen Resultate zum Beweis der Überlegenheit thermophiler Schlammbehandlung, sondern in der Mehrzahl sich widersprechende Ergebnisse. Der Grund hierfür ist in der Versuchsanstellung selbst zu sehen, bei der wesentliche Voraussetzungen für einen aussagekräftigen Leistungsvergleich nicht oder nicht hinreichend beachtet wurden.

Eine Grundbedingung wäre die Verwendung optimal an die jeweilige Temperatur adaptierter Bakterienpopulationen. Hierbei bedeutet Temperaturadaption allerdings nicht die Anpassung der vorhandenen Bakterienflora an eine andere Temperatur, sondern die Selektion anderer Stämme und Arten, weshalb vor Erfassung der Leistungsdaten die Einstellung des neuen Gleichgewichtszustandes abgewartet werden muß. Vor allem bei früheren Untersuchungen der Temperaturabhängigkeit wurden mangels Kenntnis dieser mikrobiologischen Gegebenheiten die Übergangszeiten beim Temperaturwechsel zu kurz gehalten, so daß sich keine konstanten Bedingungen einstellen konnten (Heukelekian, 1930; Sierp, 1931) und der Aussagewert dieser Versuche dementsprechend gering ist. Des weiteren läßt bei den im batch-Betrieb durchgeführten Versuchen ein sehr ungünstiges Verhältnis von Impf-Frischschlamm (Maly u. Fadrus, 1971, Tab. 1) bestenfalls einen Schluß auf das Verhalten von Bakterienpopulationen gegenüber extremen Stoßbelastungen zu, nicht jedoch Aussagen über das tatsächliche Leistungsvermögen unter Praxisbedingungen. Die bei Versuchen solcher Art festgestellte geringere Fermenta-

tionsdauer im thermophilen Bereich zur Erreichung der praktisch erzielbaren Gasmenge (Fair u. Moore, 1937; Tab. 1 u. Abb. 1) kann deshalb nicht als Beweis für ein größeres Leistungsvermögen thermophiler Bakterienpopulationen gewertet werden.

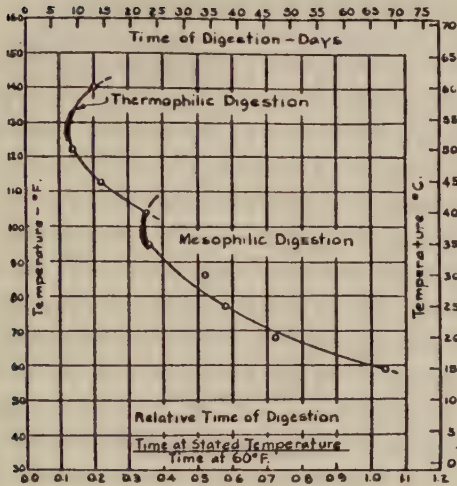


Abb. 1: Beziehung zwischen Fermentationsdauer und Faulraumtemperatur (Fair und Moore, 1937).

Im Gegensatz zu diesen, mit einem Vorbehalt zu versehenen Standversuchen, lassen die bisher mit Klärschlamm als Substrat unter steady-state-Bedingungen durchgeführten Versuche (halbkontinuierlicher Betrieb) hinsichtlich Abbaugeschwindigkeit und Gasproduktion keinen Vorteil thermophiler Prozeßführung erkennen, wenn man von den Versuchen absieht, die einen bei thermophilen Temperaturen rascheren Abbau von Cellulose andeuten (Pfeffer, 1974, Tab. 1; Cooney u. Wise, 1975, Tab. 1; Cooney u. Ackermann, 1975, Tab. 1). Grund für die geringen Leistungsunterschiede zwischen den beiden Temperaturbereichen könnten die für die Vergleichsuntersuchungen gewählten relativ langen Verweilzeiten sein (Golueke,

1958, Tab. 1; Garber, 1954 u. 1975, Tab. 1), bei denen eventuelle Vorteile des thermophilen Betriebs nicht mehr zum Ausdruck kommen. Die Versuche zum Nachweis größerer Leistungsfähigkeit thermophiler Bakterienpopulationen müßten deshalb bei sehr hohen organischen Belastungen bzw. niederen Verweilzeiten durchgeführt werden, weshalb von den bisherigen Untersuchungen zu diesem Thema die Versuche von Malina (1961, Tab. 1), der selbst bei Haltezeiten von 6 Tagen und Raumbelastungen von knapp 5 oTS/1*Tag keinen Vorteil thermophiler Prozeßführung feststellen konnte, die größte Aussagekraft besitzen.

Um einen Beitrag zur endgültigen Klärung dieses Sachverhaltes zu leisten, wurden von uns im Rahmen eines vom Bundesministerium für Forschung und Technologie geförderten Projektes (BMFT-Projektnummer PTB 8151) Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit thermophiler Klärschlammbehandlung durchgeführt. Da es Ziel der vorliegenden Arbeit ist, zu einer möglichst umfassenden Beurteilung der Leistungsfähigkeit und Praxisauglichkeit thermophiler Prozeßführung zu kommen, beschränkten sich die Untersuchungen nicht nur auf die Abbauleistung und die Gasproduktion, sondern schlossen auch andere wichtige Faktoren wie beispielsweise die Entwässerbarkeit des fermentierten Schlammes, die von Garber (1975) hervorgehoben wurde, oder die in den letzten Jahren aktuell gewordene Hygienisierung (Klärschlammverordnung, 1982) mit ein.

Nach einer von Prof. O. Kandler (1976) im Auftrag des BMFT verfaßten Studie über "Stand und Möglichkeiten der Abwasserreinigung mit Hilfe thermophiler Mikroorganismen" stellte sich der Wissens- bzw. Kenntnisstand zu Beginn unserer Untersuchungen wie folgt dar.

Im Vergleich zu mesophiler Prozeßführung könnten sich

a) mögliche Vorteile thermophiler Verfahrensweise ergeben durch

- 1) eine höhere Abbaugeschwindigkeit (Verkürzung der Schlammverweilzeiten)
- 2) eine bessere Entwässerbarkeit des ausgefaulten Schlammes
- 3) eine praktisch vollständige Hygienisierung

b) mögliche Nachteile thermophiler Verfahrensweise ergeben durch

- 1) einen höheren Energieaufwand
- 2) eine geringere Prozeßstabilität
- 3) eine stärkere Geruchsbelästigung durch den fermentierten Schlamm.

In der folgenden Arbeit wurden im Rahmen eines Leistungsvergleiches "mesophile - thermophile Methangärung" zu jedem der angesprochenen Punkte geeignete Versuche durchgeführt und Stellung bezogen.

Tab.1: Versuchsergebnisse von Fermentationen verschiedener Substrate bei meso- und thermophilen Temperaturen

Substrat	Reaktor	Reaktorbetrieb	Temp. °C	Raumbelastung g oTS/1.Tag	Verweilzeit Tage	Gasproduktion ml Gas/g oTS zugeführt	Abbau d. oTS %	Autor
Klär- schlamm	Kleinbe- hälter	Standversuch	20	ca 10 ¹⁾	47	478	-	Fair u. Moor (1937)
			35	ca 10	24	478	-	
			40	ca 10	23	478	-	
			45	ca 10	14	478	-	
			50	ca 10	9	478	-	
			60	ca 10	13	478	-	
Klär- schlamm	Kleinbe- hälter	Standversuch	20	ca 16 ¹⁾	80-100	498	46,0	Maly u.Fadru (1971)
			30	ca 16	33-50	540	49,4	
			50	ca 16	20	533	50,3	
97 % Hausmüll 3 % Klär- schlamm	Kleinbe- hälter	halbkontinuier- lich	35	3	4	171	-	Pfeffer (1974)
			35	3	10	263	-	
			35	3	30	284	-	
			50	3	4	234	-	
			50	3	10	369	-	
			50	3	30	400	-	
			60	3	4	455	-	
			60	3	10	441	-	
90 % Hausmüll 10 % Klär- schlamm	Kleinbe- hälter	halbkontinuier- lich	37	0,4 ¹⁾	30	470	-	Cooney u. Wise (1975)
			65	0,4	30	690	-	
80 % Zel- lungspapier 20 % Klär- schlamm	Kleinbe- hälter	halbkontinuier- lich	55	15,3 ¹⁾	3	5,6 ²⁾	30 ³⁾	Cooney u. Ackerman (1975)
			55	9,2	5	7,8	14	
			55	4,6	10	3,2	16	
			55	3,1	15	2,1	30	
			55	1,9	24	3,4	18	
Klär- schlamm	Kleinbe- hälter	halbkontinuier- lich	35	1,4	30	-	52,8	Golueke (1958)
			55	1,4	30	-	49,9	
			65	1,4	30	-	47,4	
Belebt- schlamm	Kleinbe- hälter	halbkontinuier- lich	32,5	4,8	6	-	39	Malina (1961)
			42,5	4,8	6	-	41	
			52,5	4,8	6	-	42	
Klär- schlamm	Groß- reaktor	halbkontinuier- lich	38	1,3-2,0	18-28	689	68	Garber (1975)
			49	1,3-2,0	18-20	751	65	

1) aus den vorliegenden Daten selbst berechnet

2) ml Gas/g TS.Tag

3) Abbau der Gesamt-TS, %

II. MATERIAL UND METHODEN

1. Versuchsaufbau

Für die Gärversuche wurden zylindrische Kulturgefäße aus Boro-silikat - Glas (Biostat V, Braun-Melsungen) mit einem Gesamtvo-lumen von 5.3 l (Füllvolumen 4.5 l) und 1.6 l (Füllvolumen 1.5 l bzw. 1.3 l) verwendet. Die Rührung erfolgte mit 3 jeweils in 5 cm Abstand an einer gemeinsamen Achse angebrachten Blatt-rührern (6 Blätter) von 6 cm Durchmesser. Die Drehzahl war stu-fenlos zwischen 50 und 1.400 Upm variierbar. Die Fermentations-temperatur war an einer kalibrierten Skala einstellbar und wur-de mit Hilfe eines geschlossenen Umlaufthermostaten (Thermo-mant, Braun- Melsungen) über einen internen Wärmetauscher auf $\pm 1^{\circ}\text{C}$ konstant gehalten. Die direkte Kontrolle der Temperatur erfolgte mittels eines Quecksilberthermometers, das durch ei-nen der unteren Deckeldurchgänge in die Gärsuspension einge-taucht war. Das gebildete Gas wurde in geeichten Gasbüretten, die mit einem Ausgleichsgefäß verbunden waren, nach dem Prin-zip der Wasserverdrängung aufgefangen und bei Atmosphärendruck gemessen. Das im abströmenden Gas enthaltene Wasser wurde zu-vor mit Hilfe eines Abgaskühlers, der mit seinem Anschlußrohr in einen der oberen Deckeldurchgänge gesteckt wurde, konden-siert (Abb. 2).

Bei Substrataustausch wurde durch Anheben des Ausgleichsge-fäßes ein Überdruck im Kulturgefäß erzeugt und dadurch der Faulschlamm durch den bis nahe an den Gefäßboden reichenden Impfstutzen sowie den darüber gestülpten, ca 1 Meter langen durchsichtigen Gummischlauch (Innendurchmesser 6 mm) gedrückt. Nach Entnahme der gewünschten Menge vergorenen Substrats wur-de durch Senken des Wasserausgleichsgefäßes ein Unterdruck im Fermenter hergestellt, durch den gleichen Schlauch frisches Substrat in das Gefäß gezogen und nach Beendigung des Sub-strataustausches der Gummischlauch mit einer Schlauchklemme abgeklemmt.

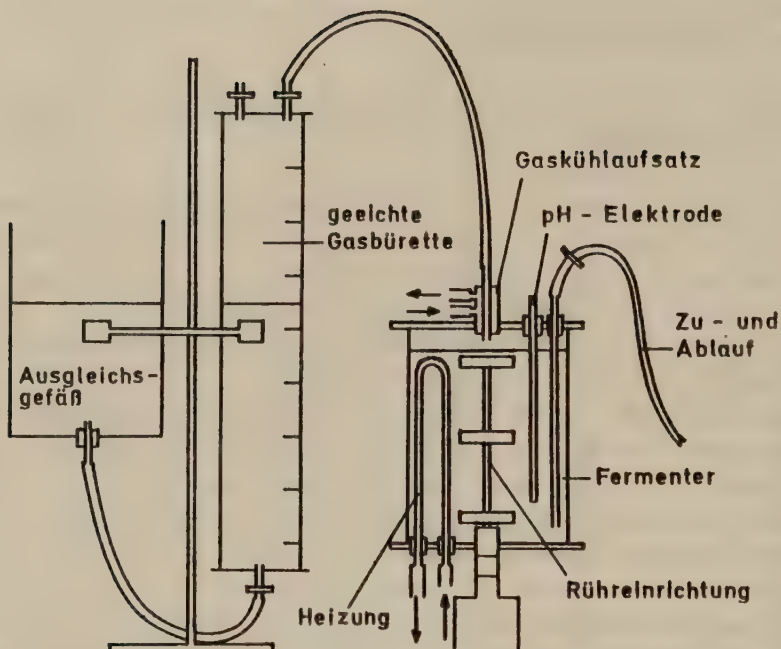


Abb. 2: Versuchsaufbau

Die Fermentationen wurden in halbkontinuierlicher Betriebsweise durchgeführt, wobei in 24-Stunden-Intervallen eine bestimmte Menge vergorenen Substrats den Fermentern entnommen und anschließend durch ein entsprechendes Volumen frischen Substrats ersetzt wurde. Die mittleren Schlammverweilzeiten errechneten sich aus dem Anteil des täglich ausgetauschten Substrats am Füllvolumen (mittlere Schlammverweilzeit = Quotient aus Füllvolumen des Fermenters und Volumen des täglich ausgetauschten Schlammes).

Die Umstellung auf eine andere Verweilzeit erfolgte in kleineren Schritten; in der Regel entsprachen aufeinanderfolgende Belastungszustände einer Differenz der mittleren Aufenthaltszeiten von ca 25 bis 50%.

Um den Einfluß verschiedener Schlammverweilzeiten bzw. Raum-

belastungen auf die Abbauleistung und die Gasproduktion zu bestimmen, wurde nach Umstellung der Fermenter auf einen anderen Belastungszustand stets die weitgehende Einstellung des neuen Gleichgewichtszustandes abgewartet (mindestens die dreifache mittlere Aufenthaltszeit).

2. Fermentationssubstrate

Als Fermentationssubstrate wurden Klärschlamm, Schweinegülle und Kartoffelschlempe eingesetzt.

Der verwendete Klärschlamm stammte aus der Kläranlage München-Großlappen; von den vier eingesetzten Schlämmen waren drei Absetzschlämme (Schlammchargen 2, 3, 4) und einer ein Gemisch aus Absetz- und Überschußschlamm (Schlammcharge 1).

Zur Erzielung einer möglichst gleichmäßigen Substratbeschaffenheit wurden die Schlämme nach Entnahme aus den Absetz- bzw. Zuzugbehältern gründlich durchmischt und anschließend in 1 l bzw. 1,5 l Plastikflaschen abgefüllt. Diese wurden eingefroren (-18°C), bei Bedarf portionsweise aufgetaut und der Inhalt vor Zugabe in die Fermentationsbehälter 30 sec. lang mit einem Ultraturrax (Janke u. Kunkel KG, Typ TP 18/2N) homogenisiert.

Die verwendete Schweinegülle stammte ebenso wie die Kartoffelschlempe aus dem Zulauf einer landwirtschaftlichen Biogasanlage (Wallner, Gilching bei München). Die Behandlung dieser Substrate war analog der von Klärschlamm.

Die Zusammensetzung der verwendeten Fermentationssubstrate ist aus Tabelle 2 zu ersehen.

3. Temperaturadaptation der Mikroorganismen

Ausgangsschlamm für alle Fermentationstemperaturen war ein bei 30°C stabilisierter Klärschlamm aus der Versuchsanlage München-Großlappen. Dieser Schlamm wurde zusammen mit 100 ml frischem Klärschlamm in 2 Kulturgefäße mit einem Füllvolumen von 4,5 l

Tab. 2: Zusammensetzung der verwendeten Fermentationssubstrate

Komponenten		Klärschlamm				Kartoffel- schlempe	Schweine- gülle
		Charge 1	Charge 2	Charge 3	Charge 4		
Trockensubstanz	g/l	31	44	43,5	43	43	73
org. Trockensubstanz	g/l	22	30	31,5	30	34	53
	% v. TS	71	68	72	70	73	73
CSB	g O ₂ /l	44,5	52,5	54,0	55,5	55	75
BSB ₅	g O ₂ /l	-	18,5	-	-	-	-
Kjeldahl-Stickstoff	g N/l	1,7	1,65	1,95	2,65	2,10	7,3
NH ₃ /NH ₄ ⁺ -Stickstoff	g N/l	0,3	0,15	0,2	0,35	0,1	3,9
Protein	g/l	8,75	9,4	10,9	14,4	12,5	21
	% v. oTS	40	30	35	48	37	40
Fett	g/l	-	-	6,0	6,3	-	5,1
	% v. oTS	-	-	19	21	-	9,5
Ges. flüchtige Säuren	mmol/l	30	14	27	28	24	162
als g Acetat/l		1,8	0,84	1,62	1,68	1,44	9,7
Milchsäure	mmol/l	-	-	17	12	99	1

gegeben und auf die gewünschten Temperaturen von 30°C bzw. 56°C gebracht. Nach Einsetzen der Gasproduktion wurde frischer Klärschlamm in kleinen Portionen (pro Tag 1/45 des Füllvolumens) zugegeben und, nachdem eine gleichmäßige Gasproduktion festzustellen war, die Menge des täglich ausgetauschten Schlammes schrittweise erhöht, bis eine mittlere Schlammverweilzeit von 11 Tagen erreicht war. Diese Verweilzeit wurde über mehrere Wochen beibehalten und anschließend ein Teil des aktiven Faulschlammes auf Kleinfermenter (1,5 l Füllvolumen) umgefüllt.

Bei Umstellung auf eine andere Fermentationstemperatur wurde jeweils die eingestellte Raumbelastung reduziert; eine erneute Belastungssteigerung erfolgte erst nach Einstellung des neuen steady-state-Zustandes. Kriterien hierfür waren die Gasproduktion, der pH-Wert sowie die Konzentration der flüchtigen Säuren. Die zeitliche Abfolge der Fermentationen ist in Abbildung 3 dargestellt.

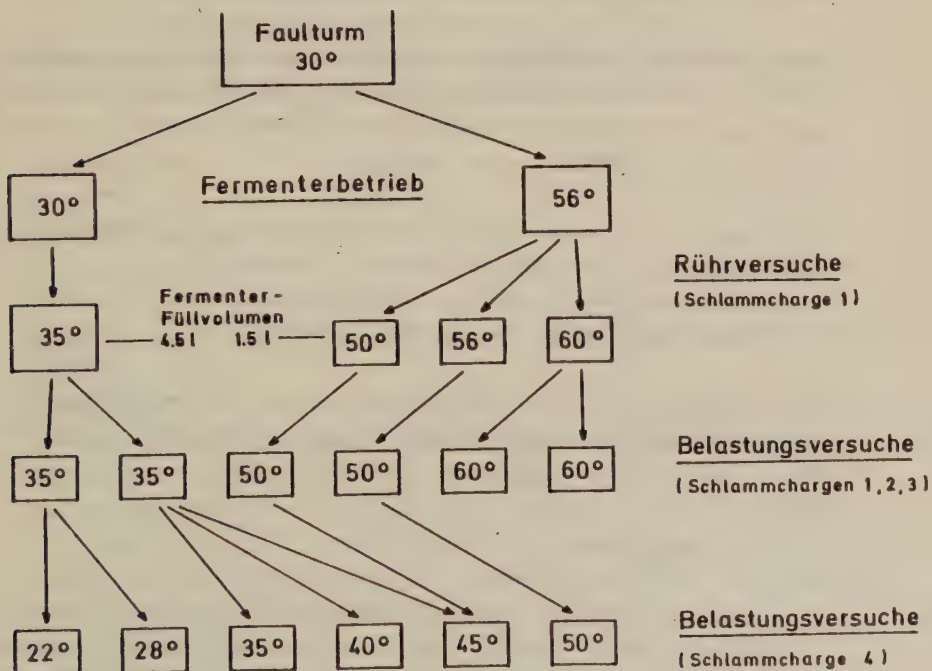


Abb. 3: Zeitliche Abfolge der Fermentationen

4. Analysen

4.1. TS- und oTS-Bestimmung

Zur Bestimmung der Trockensubstanz (TS) wurde frischer bzw. fermentierter Klärschlamm zunächst 30 sec. lang mit einem Ultraturrax homogenisiert, 50 ml des Schlammes in eine Porzellanschale mit bekanntem Gewicht gegeben und anschließend die Probe in einem Trockenschrank bei 105°C 12 Stunden lang getrocknet. Nach Erkalten im Exsikkator wurde die Schale mit dem Trockenrückstand auf einer Analysenwaage (auf 0,01g genau) gewogen.

Die Trockensubstanz ergibt sich aus der Gleichung:

$$(b - a) \cdot 2 = \text{g TS}/100 \text{ ml Schlamm } (= \% \text{ TS})$$

a Gewicht der leeren Schale

b Gewicht der Schale mit dem Trockenrückstand

Zur Ermittlung des Glühverlustes (GV) als Maß für die organische Trockensubstanz (oTS) wurde die Probe aus der TS-Bestimmung in einem Muffelofen 4 Stunden lang bei 620°C geglüht und nach Erkalten im Exsikkator erneut gewogen.

Die organische Trockensubstanz ergibt sich aus der Gleichung:

$$(b - c) \cdot 2 = \text{g oTS}/100 \text{ ml Schlamm } (= \% \text{ oTS})$$

b Gewicht der Schale mit dem Trockenrückstand

c Gewicht der Schale mit dem Glührückstand

Bei den in den Tabellen angegebenen Werten für die TS bzw. oTS handelt es sich um den Mittelwert aus zwei Parallelproben.

4.2. CSB-Bestimmung

Der chemische Sauerstoffbedarf (CSB) des Schlammes wurde nach einer modifizierten Version der Hach-Methode (Wolf u. Nordmann, 1977) bestimmt. Diese Methode beruht darauf, daß bei Anwesenheit oxidierbarer Stoffe Cr^{6+} (gelb) zu Cr^{3+} (grün) reduziert wird,

das bei 615 nm photometrisch bestimmt werden kann.

Zur CSB-Bestimmung wurde zunächst der frische bzw. fermentierte Schlamm 30 sec. lang mit einem Ultraturrax homogenisiert, anschließend mit bidestilliertem Wasser verdünnt (CSB der zu messenden Probe: $< 1.000 \text{ mg O}_2/\text{l}$) und diese Lösung noch einmal 30 sec. lang mit dem Ultraturrax behandelt. 2 ml des verdünnten Schlammes wurden nun in ein Reaktionsröhrchen aus Borosilikatglas (Fa. Hach Chemical Company, Ames, USA), das 3 ml der Reaktionslösung enthielt, pipettiert und dieses nach Verschließen und vorsichtiger Durchmischung des Inhalts in einem thermostatisierten Heizblock (Fa. Liebisch, Bielefeld) bei 140°C 2,5 Stunden erhitzt. Nach Abkühlung auf Raumtemperatur wurde das Reaktionsgemisch gegen eine gleichbehandelte Probe, die statt verdünntem Schlamm bidestilliertes Wasser enthielt, bei einer Wellenlänge von 615 nm (Gilson-Photometer, Stasar II) photometriert. Der der jeweiligen Extinktion entsprechende CSB-Wert konnte einer Eichgeraden entnommen werden, die mit Phtalsäure als Eichsubstanz aufgestellt wurde.

Bei den in den Tabellen angegebenen CSB-Werten handelt es sich um den Mittelwert aus fünf Parallelproben.

Reagenzien

Reaktionslösung

15 g $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ p.a. und 10 g Ag_2SO_4 p.a. werden in einer Säuremischung, bestehend aus 750 ml H_2SO_4 p.a. ($d = 1.84$) und 250 ml H_3PO_4 p.a. ($d = 1.71$), gelöst; die Lösung wird im Kühlschrank aufbewahrt.

Eichlösung

850.2 mg Kaliumhydrogenphthalat werden in 1 l bidestilliertem Wasser gelöst und von dieser Stammlösung, die einem theoretischen CSB-Wert von $1.000 \text{ mg O}_2/\text{l}$ entspricht, die Eichlösungen (CSB-Werte von 125 mg, 250 mg, 500 mg und $750 \text{ mg O}_2/\text{l}$) durch Verdünnen mit bidestilliertem Wasser hergestellt. Die Lösungen werden im Kühlschrank aufbewahrt.

Das bei dieser Methode vorgesehene Quecksilber (II) - Sulfat zur Maskierung von Chlorid-Ionen erwies sich wegen der geringen Chlorid-Konzentrationen im eingesetzten Klärschlamm als nicht notwendig.

4.3. BSB₅-Bestimmung

Der biochemische Sauerstoffbedarf bei einer Zehrungsdauer von fünf Tagen (BSB₅) wurde in einem Sapromaten (Fa. Voith, Heidenheim) bestimmt. Bei diesem Gerät wird der für den Stoffwechsel der Mikroorganismen notwendige Sauerstoff durch eine Elektrolysezelle (Kupfersulfat-Lösung) nachgeliefert, wodurch eine Sauerstoffverarmung im Reaktionsgefäß vermieden wird.

Vor Ermittlung der Sauerstoffzehrung wurde der zu untersuchende Schlamm mit einer Minerallösung verdünnt (i.a. 1 : 10) und nach Zusatz von Allylthioharnstoff (Verhinderung der Nitrifikation) mit einer Bakteriensuspension angeimpft. Die eingesetzten Bakterien stammten aus einer Belebungsanlage mit Abwasser aus der Hefefabrikation.

Reagenzien

Puffer- und Nährsalzlösungen (Stammlösungen)

nach DEV zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung, Blatt H5, 4. Lieferung, Ausgabe 1966;

Allylthioharnstofflösung (Stammlösung)

10 g Allylthioharnstoff werden in 1 l aqua dest. gelöst;

Bei Herstellen der Gebrauchslösung werden 1 l aqua dest. je 1 ml der Stammlösungen (Allylthioharnstoff 0.3 ml) zugesetzt;

4.4. Fettbestimmung

Die Fettbestimmung erfolgte nach der Methode von Hallermayer (1976). Bei dieser Methode wird das im Schlamm enthaltene Fett in einem Methanol-Chloroform-Gemisch extrahiert und nach Abdampfen des Lösungsmittelgemisches gravimetrisch bestimmt. Zur Fettbestimmung wurden zunächst 10 ml der Schlammprobe mit 35 ml Methanol-Chloroform (1 : 1) versetzt, das Gemisch 30 sec. lang mit einem Ultraturrax homogenisiert und anschließend 10 min. bei 2.500 Upm abzentrifugiert. Von den erhaltenen drei

Phasen wurde die obere abgesaugt und verworfen; der Rest wurde erneut mit Methanol- Chloroform (30 ml) versetzt, homogenisiert und abzentrifugiert. Von den nun erhaltenen zwei Phasen wurde die obere in einen 100 ml Meßzylinder abdekantiert, der Rückstand (Feststoffe) noch zweimal mit je 30 ml Methanol-Chloroform extrahiert und die Überstände vereinigt. Die vereinigten Extrakte wurden anschließend mit Methanol-Chloroform auf 100 ml ergänzt, in einem Scheidetrichter mit 15 ml 0.58 %iger NaCl-Lösung versetzt und gut geschüttelt. Nach der Trennung in zwei Phasen wurde die untere Phase (Chloroform-Fett-Gemisch) in ein Aluminiumschälchen abgelassen und die Probe auf einer Heizplatte bei 60 - 70°C unter dem Abzug eingedampft (30 min.). Daran anschließend wurde die eingedampfte Probe im Trockenschrank bei 105°C ca 10 min. getrocknet, im Exsikkator abgekühlt und auf einer Analysenwaage gewogen.

Auswertung: Fettgehalt (g/l) = (a - b) · x

a Gewicht Aluschälchen mit Schlammprobe

b Gewicht Aluschälchen leer

x Korrekturfaktor, bei 10 ml Schlammvolumen x = 100

4.5. Stickstoff-Bestimmung

4.5.1. Ammonium - Stickstoff

Die Analysen wurden nach DEV zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung, Blatt E5, 7. Lieferung, Ausgabe 1975, durchgeführt. Die maßanalytische Bestimmung erfolgte nach vorhergehender Destillation von Ammoniak.

4.5.2. Organisch gebundener Stickstoff

Die Analysen wurden nach DEV zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung, Blatt H11, 7. Lieferung, Ausgabe 1975, durchgeführt. Bei dieser Methode wird der organisch gebundene Stickstoff durch Kjeldahl-Aufschluß in Ammonium- Ionen übergeführt; diese werden als Ammoniak abdestilliert und maßanalytisch bestimmt.

Bei Berechnung des organisch gebundenen Stickstoffs muß der NH_3/NH_4 -Anteil aus der Bestimmung des Ammonium-Stickstoffs vom Gesamt NH_3/NH_4 -Stickstoff nach dem Aufschluß abgezogen werden.

4.6. Bestimmung der organischen Säuren

Die flüchtigen und nicht-flüchtigen organischen Säuren wurden sowohl qualitativ als auch quantitativ durch Gaschromatographie bestimmt. Der verwendete Gaschromatograph (Fa. Packard, Modell 433 mit automatisiertem Integrationsteil) war mit einem Flammenionisationsdetektor ausgerüstet.

Säule: Stahlsäule (Länge 180 cm, Querschnitt 1/8 Zoll)

Säulenfüllmaterial: Chromosorb 101 (80/100 mesh)

Trärgas: Stickstoff

Durchflußrate: 25 ml/min.

Detektor- und Injektortemperatur: 250°C

Ofentemperatur: a) flüchtige organische Säuren: konstant 195°C

b) nichtflüchtige organische Säuren: Temperaturprogramm - 6 min. bei 150°C, 15°C pro min. bis 200°C, 15 min. bei 200°C

Die Identifizierung der jeweiligen Säuren erfolgte durch Vergleich der Retentionszeiten mit Säure-Standardproben; die Konzentrationen errechneten sich aus dem Flächeninhalt der Peaks.

4.6.1. Flüchtige organische Säuren

2 ml der zu untersuchenden Probe (frischer oder fermentierter Schlamm) wurden in einem Eppendorf-Reaktionsgefäß bei 12.000 Upm abzentrifugiert (Eppendorf-Zentrifuge 320, 2 min.), 1 ml des Überstandes in ein zweites Reaktionsgefäß pipettiert, mit 0,05 ml 50 %iger H_2SO_4 versetzt ($\rightarrow$ pH 2) und anschließend 2 bzw. 4 µl von dieser Lösung in den Gaschromatographen eingegeben.

Säure-Standard (Stammlösung: 1 mmol/100 ml aqua bidest.):

Essigsäure 0,057 ml, Propionsäure 0,075 ml, Isobuttersäure und

Buttersäure 0,091 ml, Isovaleriansäure und Valeriansäure 0,109 ml, Isocaproensäure und Caproensäure 0,126 ml;

4.6.2. Nicht-flüchtige organische Säuren

2 ml der zu untersuchenden Probe (frischer oder fermentierter Schlamm) wurden in einem Eppendorf-Reaktionsgefäß bei 12.000 Upm abzentrifugiert (Eppendorf-Zentrifuge 320, 2 min.) und 1 ml des Überstandes nach Zugabe von 0.1 ml 4 n HCl bis zur Trockene abgeblasen. Der Rückstand wurde in 1 ml eines Gemisches aus Methanol/HCl (1 Teil HCl konz., 10 Teile Methanol) aufgenommen und die Probe anschließend in kleinen Gläsern mit Rückflußkühlern eine Stunde lang derivatisiert. Nach dem Abkühlen wurden 1 ml dest. Wasser sowie 0,5 ml Chloroform zugesetzt und nach Ausschütteln 2 µl der Chloroformphase in den Gaschromatographen eingegeben.

Säure-Standard (mg/ml aqua bidest.)

Succinat 1 mg, Pyruvat 10 mg, Lactat 10 mg.

4.7. Enzymatische Bestimmungen

Enzymatisch bestimmt wurden Milchsäure und Äthanol. Hierzu wurde der zu untersuchende Schlamm abzentrifugiert und ein Aliquot des Überstandes für den Test eingesetzt. Das bei beiden enzymatischen Reaktionen gebildete NADH, H^+ wurde bei 366 nm im Photometer gemessen.

4.7.1. Milchsäurebestimmung

Die Milchsäure wurde nach der Methode von Hohorst (1970) bestimmt. Dem Test liegt folgende enzymatische Reaktion zugrunde:



Durch Zugabe von NAD^+ und dem Enzym Lactatdehydrogenase (LDH) wird Lactat zu Pyruvat oxidiert; die gebildete Menge an NADH, H^+

ist der Menge an L- bzw. D-Lactat proportional.

4.7.2. Äthanolbestimmung

Äthanol wurde nach der Methode von Beutler u. Michal (1977) bestimmt. Bei der enzymatischen Reaktion



wird Äthanol in Gegenwart von NAD^+ und dem Enzym Alkoholdehydrogenase (ADH) zu Acetaldehyd oxidiert; die Menge des gebildeten NADH, H^+ ist der Äthanolmenge proportional.

4.8. Bestimmung der Gase

Die Bestimmung der Gase erfolgte durch Gaschromatographie. Der verwendete Gaschromatograph (Fa. Packard, Modell 427) war mit einem Wärmeleitfähigkeitsdetektor ausgerüstet.

Säule: Stahlsäule (Länge 180 cm, Querschnitt 1/8 Zoll)

Säulenfüllmaterial: Porapak N (80/100 mesh)

Trägergas: Helium für CO_2 , CH_4

Stickstoff für CH_4 , H_2 , H_2S

Durchflußrate: 40 ml/min.

Ofentemperatur: 110°C

Detektor- und Injektortemperatur: 150°C

Zur Gasbestimmung wurde zunächst ein Teil des in der Gasbürette aufgefangenen Gases über eine Schlauchverbindung in eine mit Wasser gefüllte Serumflasche (Volumen ca. 100 ml) geleitet und diese nach Verdrängung des Wassers mit einem Gummistopfen luftdicht verschlossen. Die zu analysierende Probe wurde anschließend der Serumflasche mittels einer verschließbaren Spritze (Pressure Lok) entnommen und in den Gaschromatographen eingegeben; das Probevolumen betrug 0,3 ml.

Die Identifizierung der Gase erfolgte durch Vergleich der Retentionszeiten mit Gas-Standardproben, der Gehalt errechnete sich aus dem Flächeninhalt der Peaks.

5. Manometrische Gaswechsellmessungen

Die Durchführung und Berechnung der manometrischen Gaswechsellmessungen erfolgte nach Umbreit et al. (1972).

Der bei den Versuchen mit der Warburg-Apparatur eingesetzte Faulschlamm wurde 24 Stunden nach der letzten Fütterung aus den Fermentern entnommen, in 50 ml Polyäthylenflaschen randvoll abgefüllt (keine Gasphase) und luftdicht verschlossen. Bis zu ihrem Gebrauch kamen die Flaschen in ein bei der Fermentationstemperatur gehaltenes Wasserbad. Der Faulschlamm fand so schnell wie möglich, spätestens jedoch 20 Minuten nach Entnahme aus den Fermentern, Verwendung. 3 ml des Faulschlammes wurden in den Hauptraum der Reaktionsgefäße und 0,6 bzw. 1 ml des verschieden konzentrierten frischen Klärschlammes in die Kipper pipettiert. Daran anschließend wurden die Reaktionsgefäße in Wasser mit konstanter Temperatur (Fermentationstemperatur) eingetaucht und, nachdem alle Warburg-Gefäße an die Manometer angeschlossen waren, die Schüttelvorrichtung in Betrieb gesetzt. Durch 15-minütige Stickstoffspülung wurden anaerobe Bedingungen im Reaktionsgefäß hergestellt. Als bei allen Versuchsansätzen gleichmäßige Gasproduktion festzustellen war, wurde der sich im Gefäßansatz befindende Klärschlamm zu dem Faulschlamm gekippt, die Gasproduktion verfolgt und die Werte protokolliert.

6. Nährmedien

6.1. Hefe-Dextrose (HD)-Medium

HD-Medium wurde als Anzuchtmedium für E.coli verwendet.

Zusammensetzung

Pepton 10 g; Hefeextrakt 5 g; Glukose 5 g; NaCl 5 g; Agar 15 g;
 Na_2HPO_4 2 g; aqua dest. 1 l;
der pH-Wert wurde mit 3 n NaOH auf 7,4 eingestellt.

6.2. Endo-Agar

Als Selektivnährboden für E.coli wurde Endo-S-Agar (Fa. Merck, Darmstadt, Art.Nr. 4043) verwendet. Der Fertignährboden wurde nach Vorschrift zubereitet.

7. Mikroskopie

Verwendet wurde ein Phasenkontrast-Mikroskop mit Fluoreszenz-Einrichtung (Fa. Zeiss, Oberkochen).

Durch die Fluoreszenz-Einrichtung ergab sich die Möglichkeit, die Methanbakterien aufgrund ihrer Eigenschaft, bei Bestrahlung mit kurzwelligem Licht (UV) grün zu fluoreszieren (Cofaktor F 420), von den anderen Keimen im Faulschlamm zu unterscheiden.

Objektiv: Neofluar 100 x /1,3 Öl, PH 3

Okular: CPLW 10 x /18

verwendete Filterzusammenstellung:

Erregerfilter: G 436

Farbteiler: FT 510

Sperrfilter: LP 520

8. Berechnungen

8.1. Berechnung des NH_3 -Anteils am Gesamt- $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ -Stickstoff

Der Anteil an freiem Ammoniak am Gesamt- $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ -Stickstoff hängt vom pH-Wert und der Temperatur ab und nimmt mit steigendem pH-Wert und steigender Temperatur zu (Abb. 4).

Die Berechnung erfolgt nach folgender Gleichung:

$$\text{NH}_3 = \frac{K_w \cdot G}{\text{H}^+ \cdot K_b + K_w}$$

G: $\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+$, durch Destillation bestimmt

K_w : $\frac{[\text{H}^+ \cdot \text{OH}^-]}{[\text{H}_2\text{O}]}$, aus: $\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{OH}^-$

K_b : $\frac{[\text{NH}_4^+ \cdot \text{OH}^-]}{[\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}]}$, aus: $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{NH}_4^+ + \text{OH}^-$

Die Werte für K_w und K_b bei den verschiedenen Temperaturen sind dem "Handbook of Chemistry and Physics", CRC-Press, Inc. Boca Raton, USA zu entnehmen.

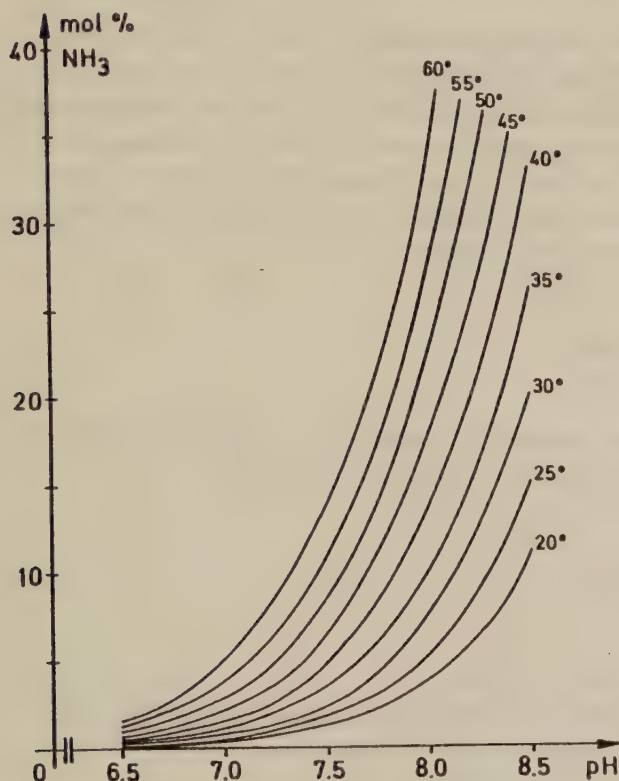


Abb. 4: Ammoniak-Anteil am Gesamt- $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ - Stickstoff in Abhängigkeit von der Temperatur und vom pH-Wert

8.2. Berechnung des Proteingehaltes

Der Proteingehalt läßt sich annähernd aus dem Gehalt des organisch gebundenen Stickstoffs errechnen, indem man den Gehalt an Stickstoff mit dem empirischen Faktor 6,25 multipliziert. Der Faktor 6,25 berücksichtigt den durchschnittlichen Molekulargewichtsanteil von Stickstoff an den Aminosäuren bzw. am Protein.

$$\text{Protein (g/l)} = \text{organisch gebundener Stickstoff (g N/l)} \cdot 6,25.$$

8.3. Ermittlung der Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten k

Durch Ermittlung der RG-Konstanten k ergibt sich die Möglichkeit, sowohl die Abbaugeschwindigkeit verschiedener Fermentationssubstrate untereinander als auch die Abbaugeschwindigkeit eines bestimmten Substrates unter verschiedenen Prozeßbedingungen zu vergleichen (Gaddy, 1974; Jewell, 1978). Der Modell-Vorstellung zugrunde liegt die vereinfachende Annahme einer Reaktion 1. Ordnung:

$$\text{a) } \quad \text{RG} = \frac{-dS}{dt} = k \cdot S$$

Durch Umformung dieser Gleichung ergibt sich für einen im steady-state-Zustand befindlichen Fermenter:

$$\text{b) } \quad \frac{S_o - S_t}{S_t} = k \cdot t$$

S_o = oTS - Zulauf

S_t = oTS - Ablauf (bei Gleichgewichtsbedingungen)

t = mittlere Schlammverweilzeit

k = RG - Konstante

Die mittlere Schlammverweilzeit t wird in einem Diagramm auf die Abszisse und der Quotient $\frac{S_o - S_t}{S_t}$ auf die Ordinate aufgetragen; die RG - Konstante k ergibt sich graphisch aus der Steigung der Geraden.

Eine Verfeinerung dieses Modells ist bei Berücksichtigung des biologisch abbaubaren Teils der organischen Fraktion möglich (Jewell, 1978). In diesem Fall wird in Gleichung b) die oTS durch den biologisch abbaubaren Teil der oTS (in Ausfaulversuchen zu bestimmen) ersetzt:

$$c) \quad \frac{BS_o - BS_t}{BS_t} = Bk \cdot t$$

III. Ergebnisse

A. Fermentationsleistungen bei meso- und thermophilen Temperaturen

1. Kommunalen Klärschlamm

In den folgenden Versuchen wurden Klärschlämme unterschiedlicher Konzentration und Zusammensetzung bei verschiedenen mesophilen und thermophilen Temperaturen bis zu Raumbelastungen von ca. 10 g oTS/l·Tag und Schlammverweilzeiten von 3 Tagen vergoren und die Fermentationsleistungen (Abbaugeschwindigkeit und Gasproduktion) bestimmt.

1.1. Gasproduktion

Bei allen Fermentationstemperaturen nahm die pro Volumeneinheit und Tag erzeugte Gasmenge mit fallenden Verweilzeiten bzw. steigender organischer Belastung der Fermenter zu. Das Maximum wurde, abhängig vom verwendeten Klärschlamm und der Temperatur, bei Verweilzeiten zwischen 5 und 3 Tagen erreicht (Tab. 3, Abb. 5, 6). Die mit ca. 4,4 l Gas/l·Tag höchsten Gasproduktionsraten wurden bei 60°C (Klärschlammchargen 2, 3) und einer Verweilzeit von 3 Tagen (Raumbelastung ca. 10 g oTS/l·Tag) gemessen, etwa 5 - 10 % niedriger lagen die Gasraten bei 35°C und 50°C. Mit Abstand die geringsten Gasproduktionsraten (unter 2 l Gas/l·Tag) aller getesteter Temperaturen ergaben sich bei 22°C (Tab. 3, Abb. 5, 6).

Bei längeren Verweilzeiten (11 - 22 Tage) waren im Temperaturbereich zwischen 28°C und 50°C die Gasproduktionsraten praktisch gleich, deutlich weniger Gas (um ca. 20 %) wurde bei 22°C erzeugt. Auch die bei 60°C pro Tag freigesetzte Gasmenge war bei den längeren Aufenthaltszeiten im Vergleich zu 35°C und 50°C signifikant geringer. Abhängig von der Schlammcharge,

machte der Unterschied bis zu 13% aus (Tab. 3, Abb. 5, 6); ähnliches trifft für die pro g abgebauter oTS gebildete Gasmenge zu (Tab. 4).

Die unterschiedliche Charakteristik in der Gasproduktion wird auch aus einer graphischen Darstellung deutlich, bei der das Gasvolumen gegen die mittlere Verweilzeit aufgetragen ist (Abb. 7). Zwar ergibt sich bei allen 3 Temperaturen (35° , 50° , 60°C) ein typischer hyperbolischer Kurvenverlauf mit einem steilen Anstieg bis zu Verweilzeiten von etwa 5 Tagen und einem relativ flachen Verlauf ab einer Verweilzeit von ca 7 Tagen; während aber die Kurven für 35°C und 50°C fast deckungsgleich verlaufen, zeigt die Kurve für 60°C einen etwas steileren Anstieg, vor allem jedoch bei längeren Verweilzeiten einen deutlich flacheren Verlauf mit nur mehr unbedeutender Zunahme der Gasproduktion ab einer Fermentationsdauer von etwa 7 Tagen. Der Schnittpunkt der Kurven von 35°C bzw. 50°C und 60°C (gleiche Gasproduktion) entspricht einer mittleren Verweilzeit von ca 5 Tagen. Das Volumen des sich während dieser Zeit (5 Tage) entwickelnden Gases machte etwa 70% der in Ausfäulversuchen ermittelten Gesamtgasmenge aus. Nach 11 Tagen waren bei Temperaturen zwischen 28°C und 50°C ca 80% des praktisch erzielbaren Gasvolumens freigesetzt.

1.2. Gaszusammensetzung

Das erzeugte Gas setzte sich praktisch ausschließlich aus Methan und Kohlendioxid zusammen. Schwefelwasserstoff und Stickstoff waren nur in Spuren (weniger als 0.2 Vol%) enthalten, Wasserstoff und Ammoniak konnten in keinem Fall nachgewiesen werden.

Der Methangehalt des produzierten Gases war abhängig vom eingesetzten Klärschlamm, der organischen Belastung der Fermenter (Verweilzeit) und der Fermentationstemperatur (Tab. 3). Bei längeren Verweilzeiten (11 - 22 Tage) war der Methananteil zwischen 22°C und 60°C praktisch gleich und lag - je nach Schlammcharge - zwischen 68% und 75%.

Mit sinkenden Verweilzeiten nahm der Methangehalt des Gases

Tab. 3: Gasproduktion und Methangehalt bei verschiedenen Fermentationstemperaturen und Schlammverweilzeiten

Schlamm-charge	Ferm.-temp. °C	Schlammverweilzeit									
		3 Tage		4 Tage		5 Tage		7 Tage		11 Tage	
		ml Gas l · Tag	Methan %	ml Gas l · Tag	Methan %	ml Gas l · Tag	Methan %	ml Gas l · Tag	Methan %	ml Gas l · Tag	Methan %
1	35	1540	55	2090	71	1825	72,5	1515	74	1040	76
	50	2190	67	2375	72	2045	72	1555	72,5	1050	74
	60	2100	68	2175	70	1885	70	1425	71	935	73
2	35	3900	69	3470	71	2050	71,5	2130	71,5	1430	73,5
	50	.	.	.	.	2910	71,5	2190	71,5	1440	73
	60	4390	68	3500	68	2935	71	2200	71	1400	72
3	35	4225	64,5	3590	64,5	.	.	.	.	1485	69
	50	4155	65	3630	65	.	.	.	.	1400	69
	60	4395	66	3620	66	.	.	.	.	1350	69
4	22	1600	51	1630	.	1730	60	1410	.	1100	67,5
	28	2070	56	2840	.	2530	66	2040	.	1360	69
	35	3150	62	3340	.	2980	67	2160	.	1400	69
	40	2900	62	3150	.	2900	67	2160	.	1400	69
	45	2830	59	3080	.	2900	67	2160	.	1400	69
	50	2400	56	2980	.	2570	66	2030	.	1400	69

Tab. 4: Gasproduktion pro g zugeführter und abgebauten oTS

Schlamm-charge	Ferm.-temp. °C	Schlammverweilzeit									
		3 Tage		4 Tage		5 Tage		7 Tage		11 Tage	
		ml Gas/lg oTS		ml Gas/lg oTS		ml Gas/lg oTS		ml Gas/lg oTS		ml Gas/lg oTS	
		zugegeb.	abgebaut	zugegeb.	abgebaut	zugegeb.	abgebaut	zugegeb.	abgebaut	zugegeb.	abgebaut
1	35	225	720	400	1030	420	1050	475	1140	510	1155
	50	320	945	455	1095	470	1105	485	1100	515	1150
	60	315	975	415	1000	430	1005	445	1015	460	995
2	35	385	1045	455	1075	470	1075	475	1045	509	1070
	50	.	.	.	.	480	1025	490	1030	505	1030
	60	420	1025	460	1030	480	1025	490	1020	490	995
3	35	400	1025	455	1035	.	.	.	.	510	1040
	50	395	1035	460	1035	.	.	.	.	510	1035
	60	415	1035	460	1035	.	.	.	.	465	950
4	22	160	680	215	.	290	965	330	920	395	975
	28	205	755	380	.	420	1045	480	1060	490	1045
	35	315	805	445	.	495	1080	505	1070	510	1030
	40	290	820	420	.	485	1070	505	1070	510	1030
	45	280	770	410	.	485	1070	505	1070	510	1030
	50	240	760	385	.	430	1050	490	1070	510	1030

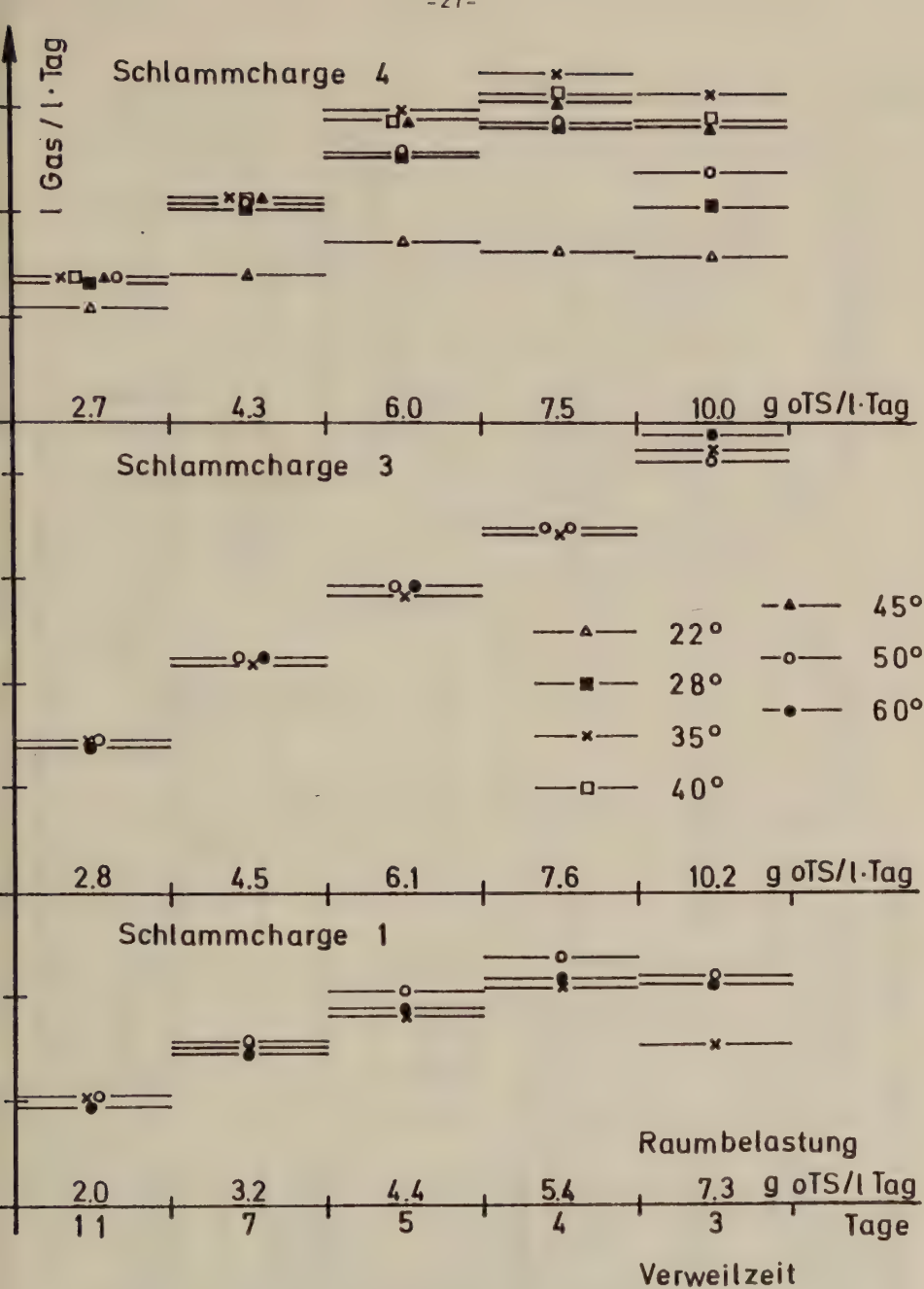


Abb. 5: Beziehung zwischen Schlammverweilzeit (Raumbelastung) und erzeugter Gasmenge bei verschiedenen Fermentationstemperaturen

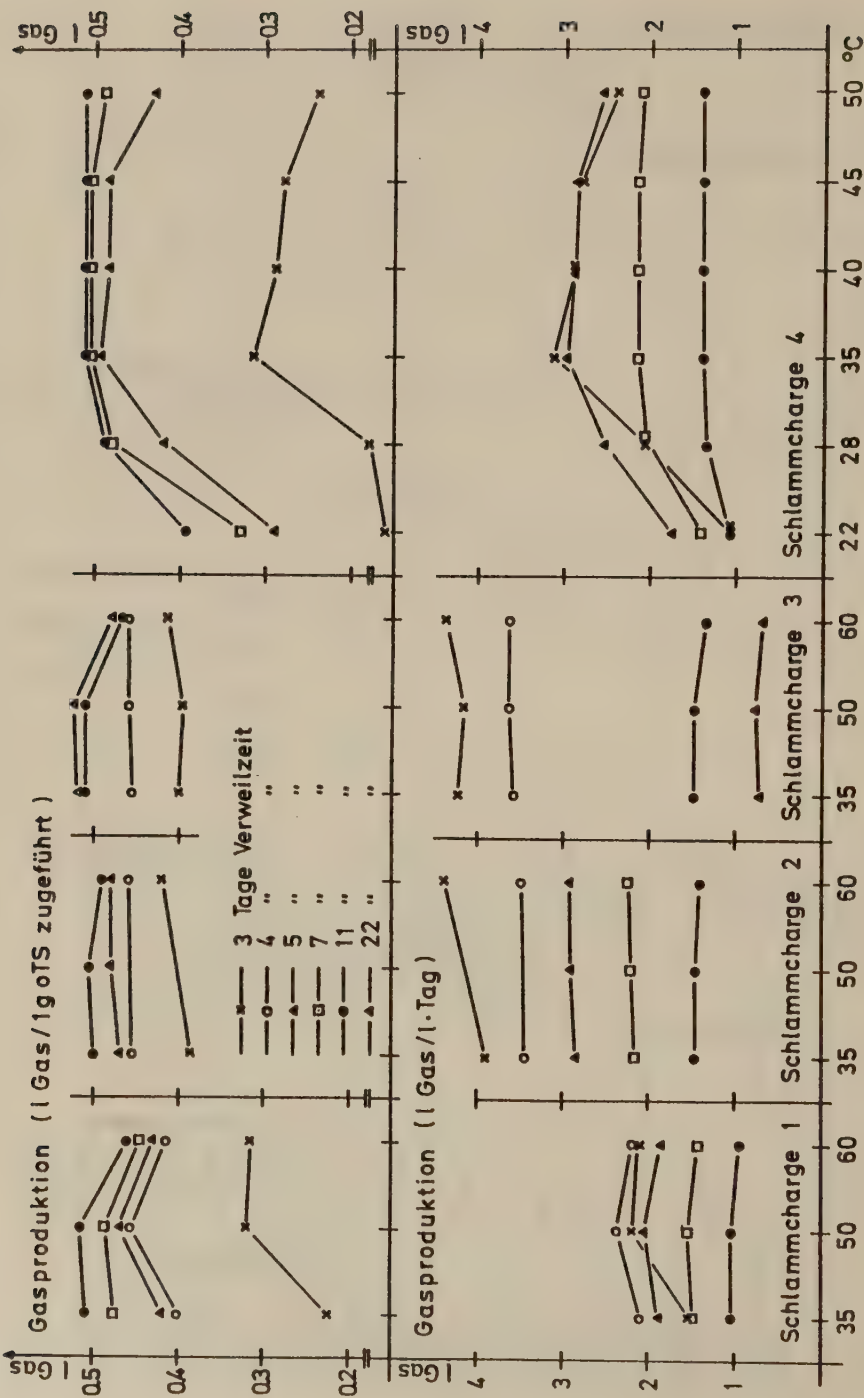


Abb. 6: Beziehung zwischen Fermentationstemperatur und erzeugter Gasmenge

Tab. 5: Beziehung zwischen Fermentationsdauer und erzeugter Gasmenge (l Gas/l · Verweilzeit) bei verschiedenen Fermentationstemperaturen

	Ferment.- dauer Tage	Fermentationstemperatur °C		
		35	50	60
erzeugte Gasmenge l	3	12,680	12,470	13,190
	4	14,360	14,520	14,480
	11	16,340	16,280	14,850
	22	16,390	16,830	15,400

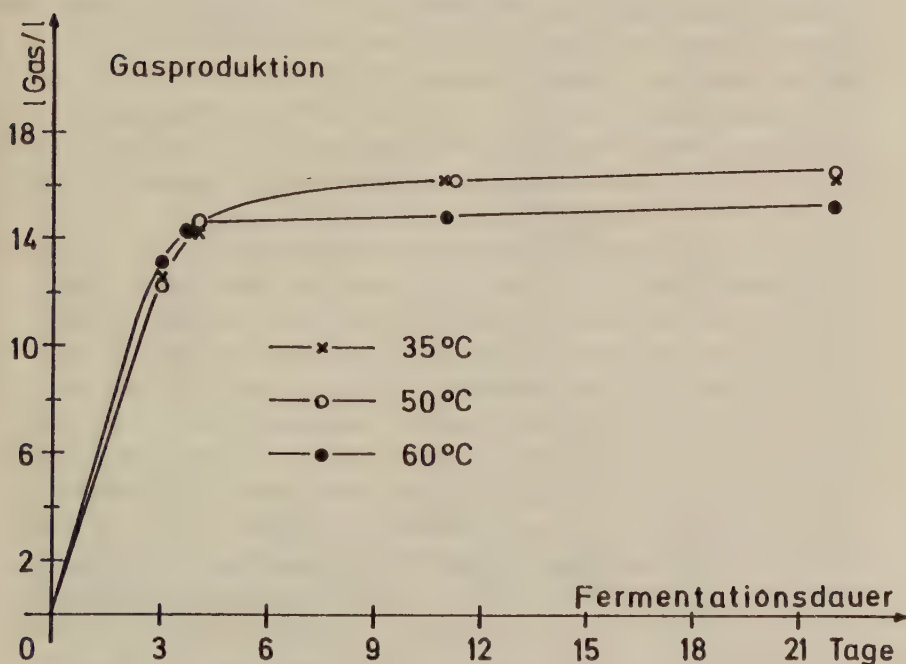


Abb. 7: Beziehung zwischen Fermentationsdauer und erzeugter Gasmenge (l Gas/l · Verweilzeit) bei verschiedenen Fermentationstemperaturen

bei allen Temperaturen ab. Die Abnahme erfolgte allerdings bis zu Verweilzeiten von etwa 4 Tagen nur sehr langsam, erst bei einer 3-tägigen Aufenthaltszeit war in einigen Fällen ein drastisches Absinken festzustellen. In keinem dieser Fälle wurde jedoch ein Methananteil von 50 % unterschritten (Tab. 3). Jeweils die geringste Abnahme im Methangehalt war bei 60°C zu beobachten, wobei mit Klärschlammcharge 3 als Substrat die Methanwerte bei Verweilzeiten von 22 Tagen (68 % CH₄) und 3 Tagen (66 % CH₄) nur um ca. 3 % auseinanderlagen.

1.3. Kinetik der Gasproduktion

Die bei allen Schlämmen untersuchte Kinetik der Gasproduktion im Verlauf eines Tages ergab für die Temperaturen zwischen 28°C und 60°C einen charakteristischen Kurvenverlauf mit sofortigem Anstieg der Gasproduktion nach Substratzufuhr, einem Maximum innerhalb der ersten Stunden und einer daran anschließenden mehr oder weniger raschen Abnahme der Gasrate bis auf den Ausgangswert. Sowohl die pro Zeiteinheit (Std.) maximal erzeugte Gasmenge als auch die Dauer zur Erreichung der höchsten Gasrate waren abhängig vom eingesetzten Schlamm, der Verweilzeit und der Fermentationstemperatur.

Die für die längeren Verweilzeiten von 11 und 22 Tagen typische Gaskinetik ist in Abb. 8 schematisch dargestellt. Auffällig hierbei ist der Unterschied zwischen den beiden thermophilen Temperaturen. Während für 60°C ein flacher Kurvenverlauf mit einer nur geringen Steigerung der Gasproduktion nach Zugabe von frischem Substrat sowie einer auch nach 24-stündiger Fermentationszeit noch relativ hohen Gasrate kennzeichnend ist, wurden bei 50°C ausnahmslos der steilste Anstieg und damit auch die innerhalb der beiden ersten Stunden höchsten Gasraten aller Temperaturen registriert. Dem Anstieg bis zur maximalen Gasproduktionsrate folgte ein etwas weniger steiler Abfall, bereits nach etwa 7 Stunden (60°C ca. 10 Stunden) waren ca. 50 % des pro Tag erzeugten Gases freigesetzt. Der Methangehalt dieses Gases war allerdings etwas geringer als der des während der weiteren Fermentation gebildeten Gases. Der Unterschied im Methananteil zwischen den ersten und letz-

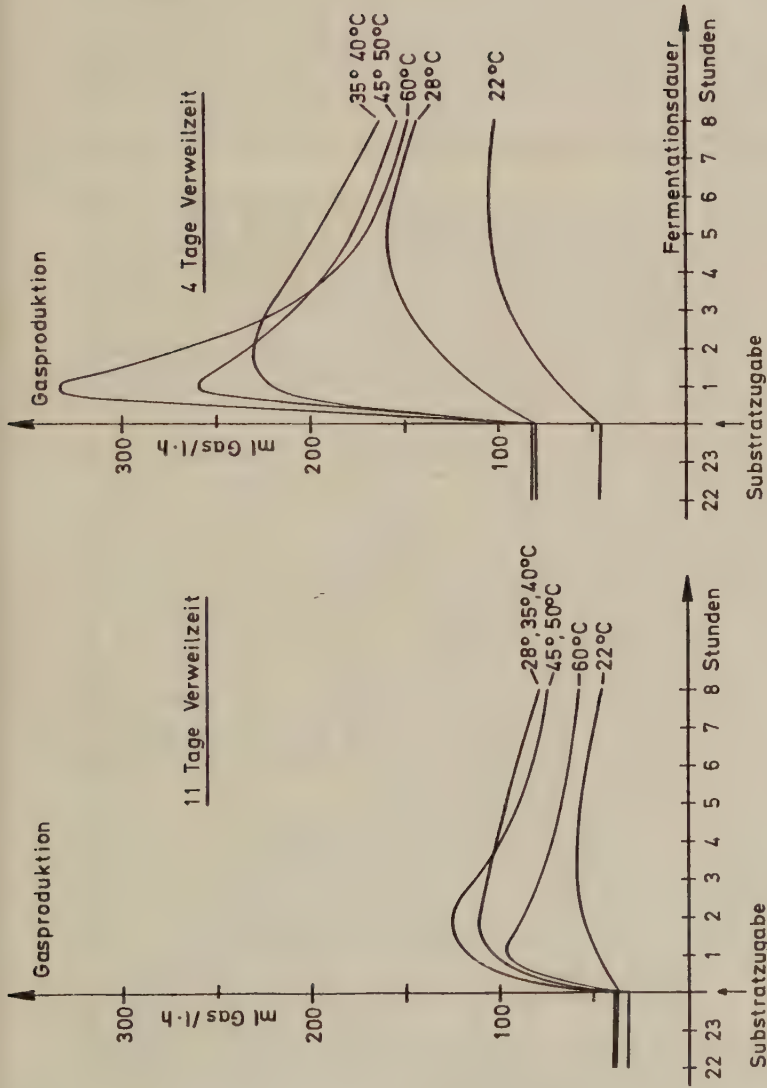


Abb. 8: Kinetik der Gasproduktion innerhalb eines Fütterungsintervalles bei verschiedenen Fermentationstemperaturen und Verweilzeiten

ten Stunden während eines Fütterungsintervalls machte etwa 7 % aus, ähnliches trifft für den mesophilen Bereich zu.

Der für 35°C ermittelte Tagesgang der Gasproduktion wies im Vergleich zu dem bei 50°C geringere Steigungen und ein breiteres Maximum auf. Wie aus dem Kurvenverlauf hervorgeht, waren sich ab einer Fermentationsdauer von etwa 12 Stunden die Gasproduktionsraten bei 35°C und 50°C ähnlich, das nach 24 Stunden erreichte Niveau lag deutlich unter dem bei 60°C beobachteten (Abb. 8).

Eine Erhöhung der Raumbelastung hatte bei allen Temperaturen eine Steigerung der Gasproduktionsraten zur Folge. Sowohl die maximalen Gasraten als auch die Gasproduktionsraten nach 24-stündiger Fermentationszeit nahmen bis zu Verweilzeiten von etwa 4 Tagen zu, eine Verkürzung der Verweilzeiten auf 3 Tage war nicht mehr in allen Fällen mit einer weiteren Steigerung verbunden.

Wie aus Abb. 8 hervorgeht, nahm bei 60°C die maximale Gasrate mit fallenden Aufenthaltszeiten wesentlich stärker zu als bei 35°C und 50°C, auch war im Gegensatz zu diesen Temperaturen bei allen eingesetzten Schlammchargen eine Steigerung der Gasrate bis zu Verweilzeiten von 3 Tagen möglich. Der Kurvenverlauf bei 60°C war geprägt durch einen steilen Anstieg mit einem Maximum bereits innerhalb der ersten Stunde und einen daran anschließenden, im Vergleich zu 50°C noch einmal deutlich rascheren Abfall der Gasraten. Die mit 380 ml Gas/1·Std. höchste Gasrate wurde ebenfalls bei 60°C mit Klärschlammcharge 3 als Fermentationssubstrat erreicht.

Die mit Abstand geringsten Gasproduktionsraten wurden bei 22°C gemessen. Im Gegensatz zu den anderen Temperaturen nahmen die Gasraten bei 22°C mit steigender Raumbelastung nur mehr unerheblich zu. Der Tagesgang war gekennzeichnet durch einen sehr flachen Anstieg und ein nur wenig ausgeprägtes Maximum, das erst nach ca. 5 - 6 Stunden erreicht wurde. Einen bei den niederen Verweilzeiten ähnlichen Verlauf, wenn auch mit höheren Gasproduktionsraten, wurde für die Tagesgangkurve von 28°C registriert (Abb. 3).

1.4. Abbau der organischen Substanz

Zwischen 22°C und 60°C waren stabile Fermentationen bis zu Verweilzeiten von 3 Tagen bzw. Raumbelastungen von $10,5 \text{ g oTS/l} \cdot \text{Tag}$ möglich. Bei allen Fermentationstemperaturen nahm die Abbauleistung mit sinkenden Verweilzeiten bis etwa 4 - 5 Tage nur relativ langsam ab, eine drastische Verminderung der Abbauleistung erfolgte erst bei einer Haltezeit von 3 Tagen.

Der im praktischen Betrieb erwünschte Abbaugrad der oTS von ca. 45 - 50 % war bei Temperaturen oberhalb 28°C bei Verweilzeiten zwischen 7 und 11 Tagen erreicht, während zur Erlangung desselben Ausfaulungsgrades bei 22°C eine Fermentationszeit von ca. 20 Tagen notwendig war (Tab. 6, Abb. 9).

Abhängig vom eingesetzten Klärschlamm, wurden bei Verweilzeiten von 3 Tagen und Temperaturen zwischen 35°C und 60°C nur mehr 30 - 40 % oTS abgebaut, bei 28°C und 22°C lag der oTS-Abbau sogar deutlich unter 30 % (Tab. 6). Noch niedrigere Werte wurden beim CSB-Abbau festgestellt. Die unterschiedlichen Abbaugrade zwischen den beiden Bestimmungsmethoden beschränkten sich allerdings auf sehr kurze Verweilzeiten (Tab. 7). Eine Ausnahme machte hier nur der bei 60°C fermentierte Schlamm, der bei längeren Haltezeiten zwar ähnliche oTS-, jedoch deutlich höhere CSB-Werte als die bei 35°C und 50°C vergorenen Schlämme aufwies. Dieses Phänomen ließ sich bei allen eingesetzten Schlammchargen feststellen, die Differenz der CSB-Werte machte teilweise über 10 % aus. Ähnliche Verhältnisse zeigten sich bei einem Vergleich der BSB_5 - Werte (Schlammcharge 2, Verweilzeit 11 Tage). Während die bei Temperaturen von 35°C und 50°C fermentierten Schlämme einen annähernd gleichen BSB_5 von etwa $4.000 \text{ mg O}_2/\text{l}$ aufwiesen - entsprechend einem BSB_5 - Abbau von 80 % - wurde für 60°C mit $6.800 \text{ mg O}_2/\text{l}$ ein deutlich höherer BSB_5 - Wert gemessen; der BSB_5 - Abbau betrug in diesem Fall nur mehr ca. 63 %.

Bei Ermittlung der Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten mit der oTS als Maß für die im Schlamm enthaltene organische Substanz ergab sich für alle Temperaturen ein typischer Kurvenverlauf mit relativ steilem Anstieg bis zu einer Verweilzeit von

Tab. 6: oTS-Abbau bei verschiedenen Fermentationstemperaturen und Verweilzeiten

Schlamm-charge	Ferm.-temp. °C	Schlammverweilzeit									
		3 Tage		4 Tage		5 Tage		7 Tage		11 Tage	
		g oTS/l	% Abbau	g oTS/l	% Abbau	g oTS/l	% Abbau	g oTS/l	% Abbau	g oTS/l	% Abbau
1	35	15,0	31,0	13,4	38,5	13,1	40,0	12,8	41,5	12,2	44,0
	50	14,4	34,0	12,8	42,0	12,6	43,0	12,2	44,0	11,8	46,0
	60	14,7	32,0	12,8	42,0	12,4	43,0	12,2	44,0	11,8	46,0
2	35	19,3	36,5	17,8	41,5	17,2	43,5	15,6	45,5	16,1	47,0
	50	.	.	.	.	16,3	46,5	15,7	49,5	15,5	49,5
	60	18,0	41,0	16,9	44,5	16,2	47,0	15,8	49,0	15,4	49,5
3	35	19,2	39,0	17,6	44,0	.	.	.	.	16,0	49,0
	50	19,5	38,0	17,5	44,5	.	.	.	.	16,0	49,0
	60	18,8	40,5	17,5	44,5	.	.	.	.	16,1	49,0
4	22	23,0	23,5	.	.	20,0	33,5	19,2	36,0	17,8	40,5
	28	21,8	27,5	.	.	17,9	40,5	16,5	45,0	15,9	47,0
	35	18,3	39,0	.	.	16,2	46,0	15,8	47,5	15,3	49,0
	40	19,4	35,5	.	.	16,2	46,0	15,8	47,5	15,3	49,0
	45	19,0	36,5	.	.	16,2	46,0	15,8	47,5	15,3	49,0
	50	20,5	31,5	.	.	16,5	45,0	16,0	46,5	15,3	49,0

Tab. 7: CSB-Abnahme bei verschiedenen Fermentationstemperaturen und Verweilzeiten

Schlamm-charge	Ferm.-temp. °C	Schlammverweilzeit									
		3 Tage		4 Tage		5 Tage		7 Tage		11 Tage	
		g O ₂ /l	% Abbau	g O ₂ /l	% Abbau	g O ₂ /l	% Abbau	g O ₂ /l	% Abbau	g O ₂ /l	% Abbau
1	35	34,4	24,5	29,1	36,0	28,5	37,5	27,3	40,0	25,5	44,0
	50	33,4	26,5	28,3	38,0	27,5	39,5	26,6	41,5	25,0	45,5
	60	34,2	25,0	30,1	34,0	29,4	35,5	29,6	37,0	28,0	38,5
2	35	37,4	29,0	.	.	.	.	28,9	45,0	26,5	49,5
	50	.	.	.	.	.	.	29,2	44,5	26,5	49,5
	60	35,7	32,0	.	.	.	.	30,6	42,0	28,7	45,5
3	35	39,2	27,5	33,4	38,0	.	.	.	.	28,3	48,0
	50	40,3	25,5	34,0	37,0	.	.	.	.	28,3	47,5
	60	37,9	30,0	34,5	36,0	.	.	.	.	31,4	42,0
4	22	47,0	15,5	.	.	37,0	31,0	.	.	31,2	41,5
	28	45,2	18,5	.	.	32,0	40,0	.	.	27,3	49,0
	35	39,7	28,5	.	.	28,5	46,5	.	.	26,5	50,5
	40	41,0	26,0	.	.	28,5	46,5	.	.	26,5	50,5
	45	42,7	23,0	.	.	28,8	46,0	.	.	26,5	50,5
	50	44,5	20,0	.	.	29,7	45,5	.	.	27,0	50,5

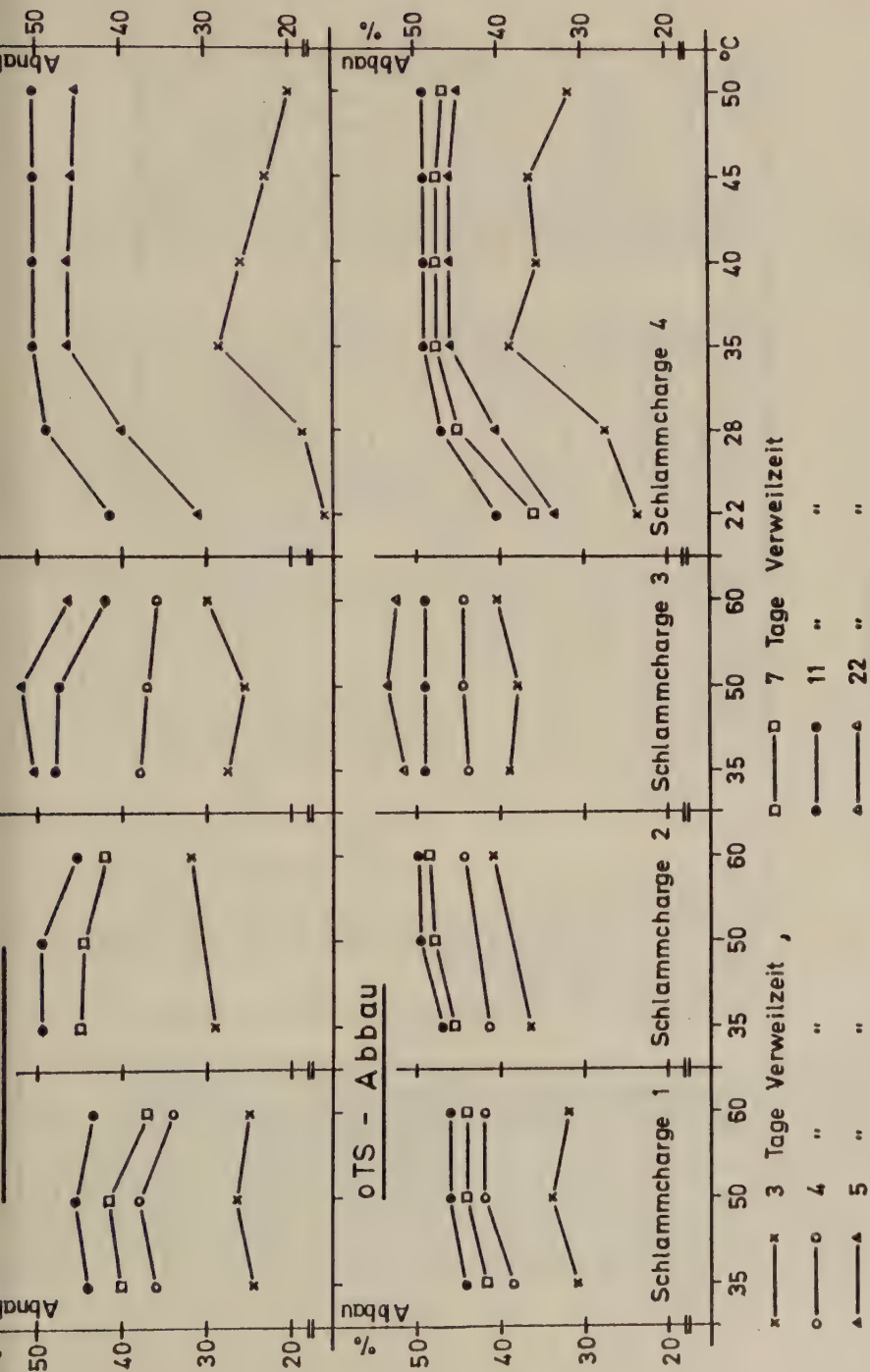


Abb. 9: OTS- Abbau und CSB-Abnahme bei verschiedenen Fermentationstemperaturen und Schlammverweilzeiten

Tab. 8: Quotienten $\frac{S_o - S_t}{S_t}$ und $\frac{BS_o - BS_t}{BS_t}$ zur Ermittlung
der Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten
 $S = oTS$; $BS =$ biologisch abbaubarer Teil der oTS

Verweilzeit Tage	Schlammcharge 1			Schlammcharge 2			Schlammcharge 3			Schlammcharge 4					
	35°C	50°C	60°C	35°C	50°C	60°C	35°C	50°C	60°C	22°C	28°C	35°C	40°C	45°C	50°C
	$\frac{S_o - S_t}{S_t}$														
3	0,45	0,51	0,48	0,58	-	0,69	0,64	0,62	0,68	0,30	0,38	0,64	0,55	0,58	0,46
4	0,63	0,71	0,71	0,71	-	0,80	0,79	0,80	0,80	-	-	-	-	-	-
5	0,66	0,74	0,76	0,77	0,87	0,88	-	-	-	0,50	0,68	0,85	0,85	0,85	0,82
7	0,71	0,78	0,78	0,84	0,94	0,93	-	-	-	0,56	0,81	0,90	0,90	0,90	0,88
9	0,77	0,82	0,85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	0,79	0,85	0,86	0,89	0,97	0,98	0,97	0,97	0,96	0,69	0,89	0,96	0,96	0,96	0,95
22	-	-	-	-	-	-	1,07	1,14	1,10	-	-	-	-	-	-
	$\frac{BS_o - BS_t}{BS_t}$														
	$\frac{BS_o - BS_t}{BS_t}$														
	$\frac{BS_o - BS_t}{BS_t}$														
3	1,4	1,6	1,5	1,4	-	1,9	1,5	1,4	1,6	0,6	0,7	1,5	1,2	1,3	1,0
4	2,2	2,8	2,8	2,0	-	2,5	2,1	2,2	2,2	-	-	-	-	-	-
5	2,4	3,0	3,1	2,3	2,9	3,0	-	-	-	1,1	1,6	2,4	2,4	2,4	2,3
7	2,8	3,3	3,4	2,7	3,5	3,4	-	-	-	1,2	2,3	2,7	2,7	2,7	2,6
9	3,3	3,7	4,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	3,6	4,0	4,1	3,1	3,8	3,9	3,1	3,1	3,0	1,7	2,6	3,1	3,1	3,1	3,1
22	-	-	-	-	-	-	3,9	4,5	4,1	-	-	-	-	-	-

Tab. 9: Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten bei verschiedenen
Fermentationstemperaturen
 k : bezogen auf oTS
 k_B : bezogen auf biologisch abbaubaren Teil der oTS

RG Konstante	Schlammcharge 1			Schlammcharge 2			Schlammcharge 3			Schlammcharge 4					
	35°C	50°C	60°C	35°C	50°C	60°C	35°C	50°C	60°C	22°C	28°C	35°C	40°C	45°C	50°C
k_1 (<4 Tg)	0,16	0,18	0,17	0,19	-	0,23	0,21	0,21	0,22	0,10	0,14	0,22	0,19	0,20	0,17
k_2 (>7 Tg)	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
k_{1B} (<4 Tg)	0,55	0,64	0,64	0,51	0,57	0,63	0,53	0,52	0,54	0,23	0,34	0,50	0,45	0,45	0,43
k_{2B} (>7 Tg)	0,19	0,18	0,19	0,10	0,09	0,11	0,09	0,13	0,10	0,10	0,09	0,10	0,10	0,10	0,13

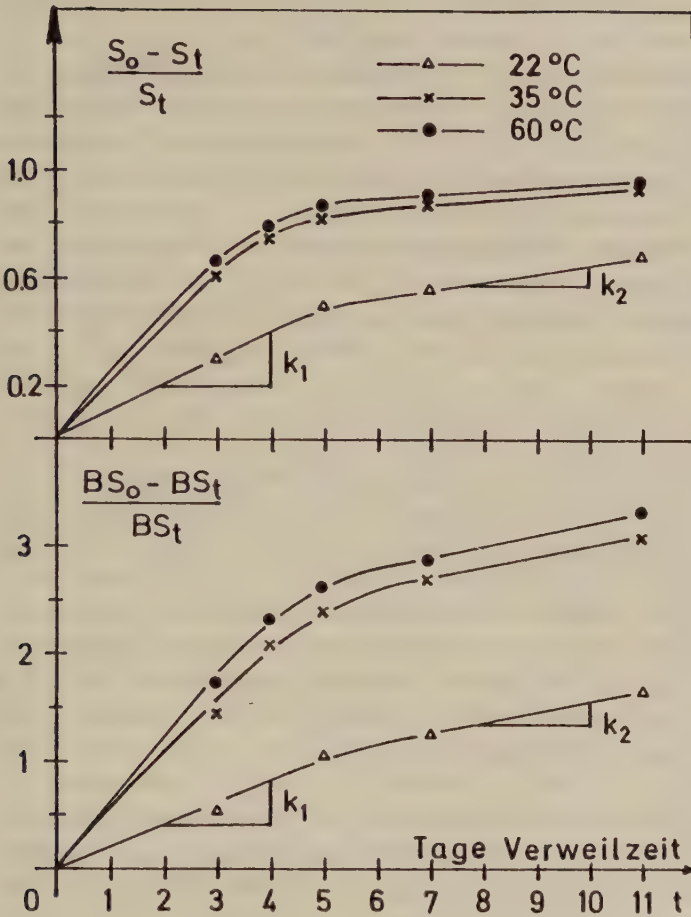


Abb. 10: Beziehung zwischen dem Abbau der organischen Substanz und der Schlammverweilzeit bei verschiedenen Fermentationstemperaturen

S = oTS; BS = biologisch abbaubarer Teil der oTS

4 - 5 Tagen (RG - Konstante k_I) und einem flachen Verlauf ab etwa 7 Tagen (RG - Konstante k_{II} , Abb. 10).

Mit den Absetzschlämmen als Substrat wurden die höchsten k_I - Werte bei $60^\circ C$ gemessen. Sie lagen etwa 10 % über denen der Temperaturen $35^\circ - 50^\circ C$; deutlich geringere Werte ergaben sich bei $28^\circ C$, während bei $22^\circ C$ die mit Abstand kleinste RG - Konstante k_I bestimmt wurde (Tab. 9).

Entsprechend dem relativ flachen Kurvenverlauf ab einer Verweilzeit von ca. 7 Tagen, lagen die für k_{II} ermittelten Werte deutlich unter denen von k_I , die geringsten Unterschiede zwischen k_I und k_{II} lagen bei $22^\circ C$ vor (Tab. 9, Abb. 10).

Ersetzt man bei Berechnung des Quotienten $\frac{s_o - s_t}{s_t}$ die oTS

durch den in Ausfaulversuchen ermittelten biologisch abbaubaren Teil der organischen Substanz, so erhält man einen wesentlich steileren, ansonsten jedoch prinzipiell gleichen Kurvenverlauf mit ebenfalls 2 verschiedenen RG - Konstanten (Abb. 10). Bei gleichbleibenden Relationen zueinander waren die Absolutwerte, entsprechend dem steileren Kurvenverlauf, deutlich höher. Die mit 0.6 höchste RG - Konstante Bk_I wurde für $60^\circ C$ bestimmt (Durchschnittswert aus 3 Schlämmen), die niederste mit ca. 0.2 lag bei $22^\circ C$ vor (Tab. 9).

Unterschiede zwischen mesophilem und thermophilem Temperaturbereich ergaben sich hinsichtlich der Abbaugeschwindigkeit von Proteinen und Fetten als den wichtigsten Klärschlammkomponenten.

Im direkten Vergleich mit 3 Schlämmen (Schlammchargen 1, 2, 3; Proteingehalt: 9 - 11 g/l; Proteinanteil an oTS : 30 - 40 %) betrug der Proteinabbau bei Verweilzeiten von 11 Tagen bei $35^\circ C$ ca. 45 % (gemittelte Werte), bei $50^\circ C$ ca. 52 % und bei $60^\circ C$ ca. 58 % (Tab. 10, Abb. 11). Der Abbau nahm bei höheren Verweilzeiten nur mehr unerheblich zu, selbst nach 2 monatiger Fermentationsdauer (Ausfaulversuche) wurde nur ein Abbau von ca. 50 % ($35^\circ C$) bzw. 58 % ($50^\circ C$) erreicht.

Die Konzentrationen des aus den Proteinen freigesetzten NH_3/NH_4^+ - Stickstoffs überschritten auch bei längeren Verweilzeiten in keinem Fall 1.200 mg/l, die höchste Konzentra-

tion an freiem Ammoniak war bei 35°C ca. 25 mg/l, bei 50°C ca. 110 mg/l und 220 mg/l bei 60°C (Tab. 10).

Im Gegensatz zu den Schlammchargen 1 - 3 wurden bei Schlammcharge 4 mit einem für Klärschlamm unüblich hohen Protein-gehalt von ca. 14.5 g/l bzw. einem Proteinanteil von annähernd 50 % sehr hohe $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ - Konzentrationen im fermentierten Schlamm erreicht. Sie lagen bei Verweilzeiten von 11 Tagen und Temperaturen zwischen 35°C und 50°C (60°C nicht im Programm) bei 1.600 mg N/l und waren auch bei einer Haltezeit von 3 Tagen nur um wenig geringer (Tab. 10). Entsprechend den $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ - Konzentrationen war der Proteinabbau zwischen 35°C und 50°C in etwa gleich (55 % Abbau), deutlich weniger Protein wurden bei 28°C und 22°C abgebaut (Tab. 10, Abb. 22). Der Gehalt an freiem Ammoniak nahm mit steigender Fermentationstemperatur und Schlammverweildauer zu; der bei halbkontinuierlichem Betrieb höchste Wert von ca. 180 mg NH_3 /l wurde für 50°C und eine Verweilzeit von 11 Tagen errechnet (Tab. 10).

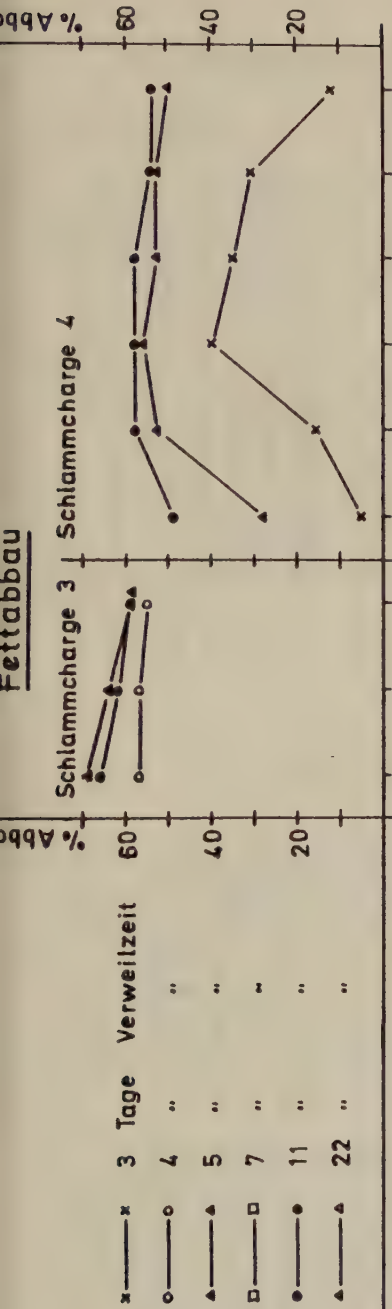
Die mit der gleichen Schlammcharge ermittelten Werte für den Fettabbau (Fettgehalt des Schlammes: ca. 6 g/l; Fettanteil an oTS: ca. 21 %) ergaben bei einer Verweilzeit von 11 Tagen den höchsten Abbau (ca. 58 %) zwischen 28°C und 40°C, etwas weniger Fett wurde bei 45°C und 50°C umgesetzt. Der geringste Fettabbau erfolgte bei 22°C. Der Abbau nahm mit sinkenden Verweilzeiten nur langsam ab; ähnlich dem Proteinabbau erfolgte auch hier eine drastische Abnahme erst bei sehr kurzen Haltezeiten. Während bei der 3 tägigen Verweilzeit bei 35°C jedoch noch ca. 40 % Fett abgebaut wurde, ging der Fettabbau bei 50°C auf ca. 12 % zurück; bei 22°C wurde fast kein Fett mehr (ca. 5 %) umgesetzt (Tab. 11, Abb. 11).

Auch mit Schlammcharge 3 als Substrat wurde Fett bei thermophilen Temperaturen langsamer abgebaut. Im Vergleich zu 35°C wurde bei einer Verweilzeit von 11 Tagen bei 50°C um 5 % und bei 60°C um knapp 10 % weniger Fett abgebaut. Im Gegensatz zu 35°C und 50°C konnte bei 60°C nach Erhöhung der Verweilzeit auf 22 Tage keine weitere Zunahme des Fettabbaues mehr festgestellt werden (Tab. 11, Abb. 11).

Tab. 10: $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ -Stickstoff und Proteinabbau bei verschiedenen Fermentationstemperaturen und Verweilzeiten

Schlammcharge	Ferm.-temp. °C	Schlammverweilzeit											
		3 Tage			4 Tage			5 Tage			7 Tage		
		NH_3/NH_4 mg N/l	freies NH_3 mg/l	Proteinabbau %	NH_3/NH_4 mg N/l	freies NH_3 mg/l	Proteinabbau %	NH_3/NH_4 mg N/l	freies NH_3 mg/l	Proteinabbau %	NH_3/NH_4 mg N/l	freies NH_3 mg/l	Proteinabbau %
1	35	875	12	41	975	18	48	975	21	48	975	24	48
	50	975	58	48	1050	69	54	1050	77	54	1050	82	54
	60	1025	143	52	1130	173	59	1130	191	59	1130	207	59
2	35	600	8	30	700	14	37	800	20	43	900	23	43
	50	.	.	.	.	.	.	850	56	46	900	74	50
	60	850	98	46	900	138	50	950	160	53	950	190	53
3	35	850	17	37	860	21	38	.	.	.	980	.	.
	50	940	50	43	1020	68	47	.	.	.	1100	.	.
	60	1050	134	49	1070	164	50	.	.	.	1150	194	54,5
4	22	1100	1	33	.	.	.	1200	3	37	1250	4	39
	28	1300	2	41,5	.	.	.	1350	15	43,5	1400	19	45,5
	35	1400	31	45,5	.	.	.	1450	41	48	1500	46	50
	40	1350	38	43,5	.	.	.	1450	58	48	1500	68	50
	45	1350	53	43,5	.	.	.	1450	79	48	1500	102	50
50	1350	52	43,5	.	.	.	.	1450	107	48	1500	153	50

Fettabbau



Proteinabbau

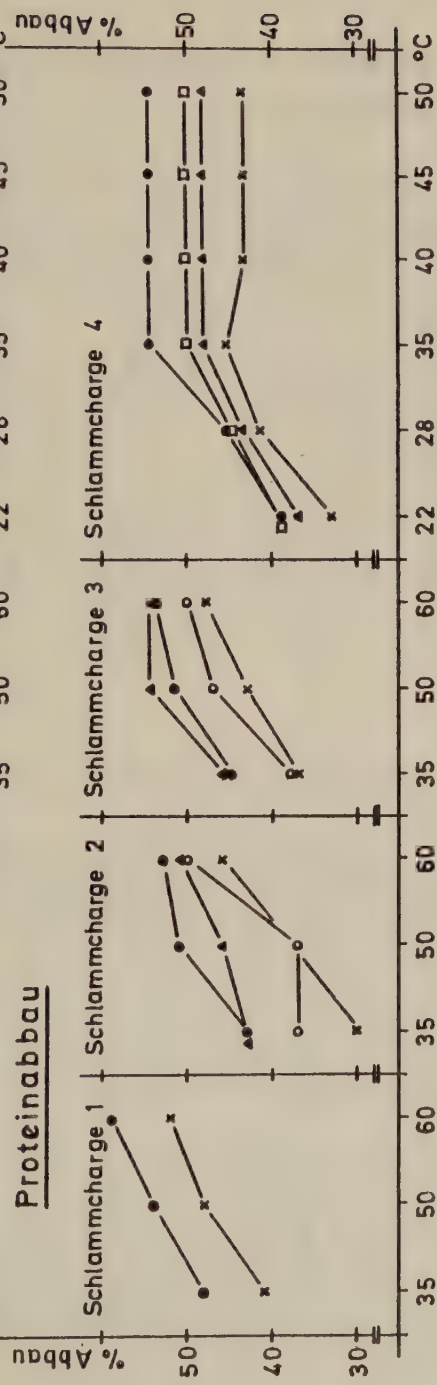


Abb.11: Abbau von Proteinen und Fetten bei verschiedenen Fermentationstemperaturen und Schlammverweilzeiten

Tab. 11: Fettabbau bei verschiedenen Fermentationstemperaturen und Verweilzeiten

Schlamm-charge	Ferm.-temp. °C	Schlammverweilzeit									
		3 Tage		4 Tage		5 Tage		11 Tage		22 Tage	
		g Fett/l	% Abbau	g Fett/l	% Abbau	g Fett/l	% Abbau	g Fett/l	% Abbau	g Fett/l	% Abbau
3	35	.	.	2,55	57	.	.	2,05	66	1,85	69
	50	.	.	2,55	57	.	.	2,25	62	2,15	64
	60	.	.	2,70	55	.	.	2,45	59	2,45	59
4	22	5,95	5	.	.	4,55	28	3,20	49	.	.
	28	5,30	16	.	.	2,95	53	2,65	58	.	.
	35	3,80	40	.	.	2,75	56	2,65	58	.	.
	40	4,10	35	.	.	2,95	53	2,65	58	.	.
	45	4,35	31	.	.	2,95	53	2,90	54	.	.
	50	5,55	12	.	.	3,15	50	2,90	54	.	.

1.5. Organische Säuren

Von den nichtflüchtigen organischen Säuren war nur Milchsäure in höheren Konzentrationen (ca. 15 mmol/l) im Frischschlamm enthalten. Sie wurde bei sämtlichen Fermentationstemperaturen (22°C - 60°C) bereits nach 11-tägiger Schlammverweilzeit vollständig umgesetzt, selbst bei einer Haltezeit von 3 Tagen erfolgte noch ein Abbau zwischen 70 und 80 %. Äthanol konnte weder im frischen noch im fermentierten Schlamm nachgewiesen werden.

Die Gesamtkonzentration der im Frischschlamm enthaltenen flüchtigen organischen Säuren war unterschiedlich hoch und variierte zwischen ca. 13 mmol/l (Schlammcharge 3) und ca. 32 mmol/l (Schlammcharge 1). Mit einem Anteil an den Gesamtsäuren von jeweils 50 % wies Essigsäure die mit Abstand höchste Konzentration der flüchtigen Säuren auf, kennzeichnend für alle Frischschlämme war ein Essigsäure/Propionsäure-

Tab. 12: Konzentrationen der Gesamt-flüchtigen organischen Säuren im fermentierten Schlamm

Schlamm-charge	Ferm.-temp. °C	3 Tage		4 Tage		5 Tage		7 Tage		11 Tage	
		mmol/l	als mg Acetat/l	mmol/l	als mg Acetat/l	mmol/l	als mg Acetat/l	mmol/l	als mg Acetat/l	mmol/l	als mg Acetat/l
1	35	33,3	1990	15,7	942	8,4	528	1,8	108	0,6	36
	50	20,2	1212	14,5	870	5,0	300	3,7	222	1,3	78
	60	38,8	2328	28,8	1728	23,7	1422	20,5	1230	18,7	1122
2	35	11,9	714	5,6	336	2,4	150	1,5	90	1,5	90
	50	.	.	.	.	9,8	594	5,8	348	1,5	90
	60	25,3	1518	21,0	1260	12,5	750	11,5	690	11,5	690
3	35	11,5	690	7,5	450	.	.	.	.	0,6	36
	50	29,5	1770	16,0	960	.	.	.	.	0,6	36
	60	29,7	1782	21,9	1314	.	.	.	.	6,5	390
4	22	33,8	2028	.	.	27,0	1674	22,9	1374	9,0	540
	28	39,9	2394	.	.	18,6	1116	4,0	240	1,5	90
	35	26,4	1584	.	.	8,4	504	1,5	90	1,0	60
	40	31,8	1908	.	.	8,9	534	1,5	90	1,0	60
	45	46,1	2766	.	.	9,4	540	1,5	90	1,0	60
	50	63,8	3828	.	.	24,1	1446	11,5	690	3,5	210

Tab. 13: Konzentrationen von Essigsäure und Propionsäure im fermentierten Schlamm

Schlamm-charge	Ferm.-temp. °C	3 Tage		4 Tage		5 Tage		7 Tage		11 Tage	
		Essigs. mmol/l	Propions. mmol/l	Essigs. mmol/l	Propions. mmol/l	Essigs. mmol/l	Propions. mmol/l	Essigs. mmol/l	Propions. mmol/l	Essigs. mmol/l	Propions. mmol/l
1	35	10	17	4	13	2,5	5	1,5	0,3	0,6	0
	50	7	11,5	5	9	1,5	3,5	1,2	2,5	1,0	0,3
	60	13,5	20	9,5	16,5	7	15	5,5	14	5	13
2	35	3,2	8	2,5	3	2	0,4	1,5	0	1,5	0
	50	-	-	-	-	2,3	7,5	1,7	4	1,5	1
	60	9,5	12,5	6,3	12	3,9	7,5	3,5	7	3,5	7
3	35	5,5	5,5	3,5	4	-	-	-	-	0,6	0
	50	5,5	15	3,5	9,5	-	-	-	-	0,6	0
	60	9,5	14,5	6,5	11,5	-	-	-	-	4	2,5
4	22	19,5	9,5	-	-	14,5	9,5	10	9,5	4,5	4,5
	28	22	12	-	-	12	5	3	1	1,5	0
	35	15	9	-	-	6	2	1,5	0	1	0
	40	15	13	-	-	6,5	2	1,5	0	1	0
	45	15	22,5	-	-	6,5	2	1,5	0	1	0
	50	22,5	23	-	-	6,5	16	2	3,5	1,5	2

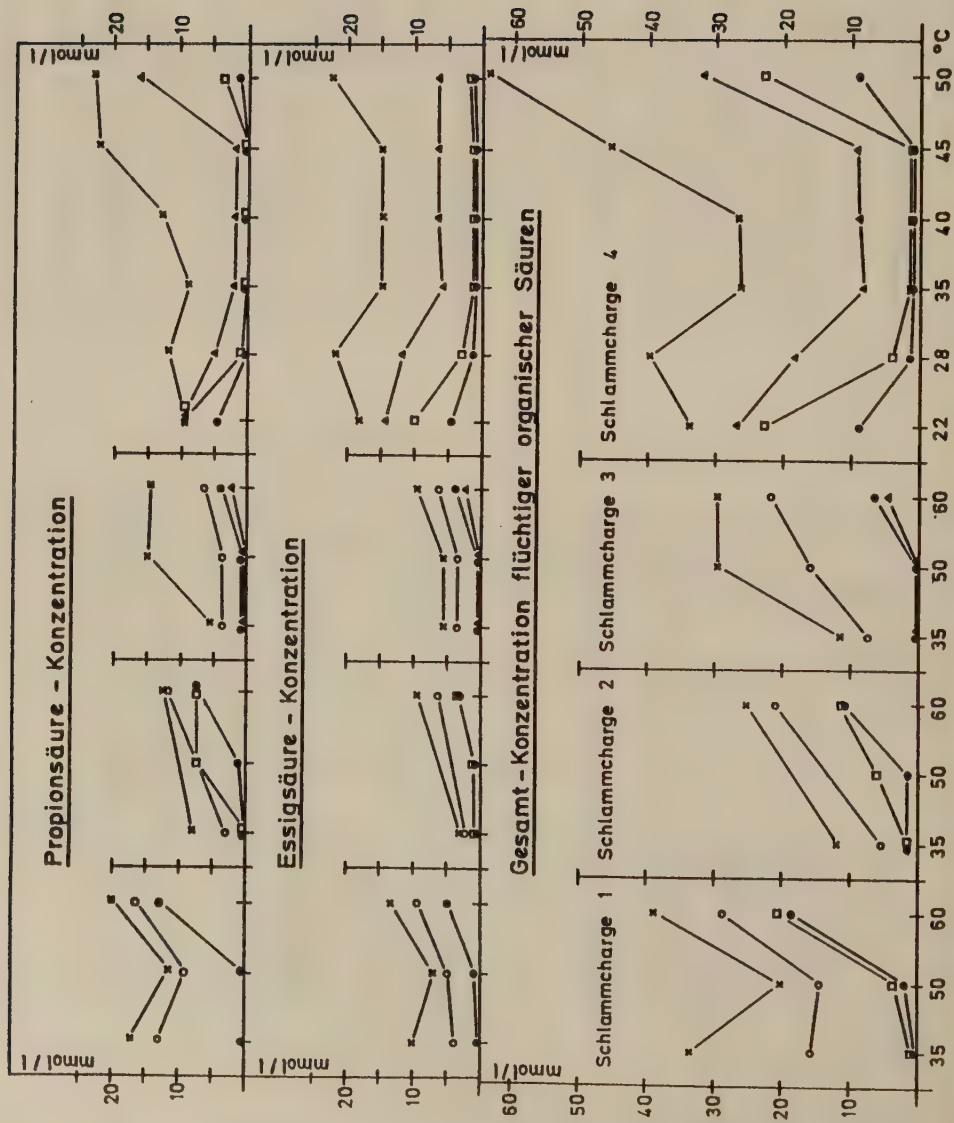


Abb. 12:

Konzentrationen flüchtiger organischer Säuren im fermentierten Schlamm

-Verhältnis von etwa 2 - 3 / 1.

Bei allen überprüften Fermentationstemperaturen erfolgte bei höheren Schlammverweilzeiten eine Abnahme der flüchtigen organischen Säuren. Unabhängig vom verwendeten Schlamm bzw. der Säurekonzentration im Frischschlamm stellten sich im Temperaturbereich zwischen 28°C und 50°C und Verweilzeiten von 11 Tagen sehr niedere Säurekonzentrationen von ca. 0,5 - 1,5 mmol/l ein. Mit zunehmender organischer Belastung der Fermenter nahm die Konzentration der flüchtigen Säuren im fermentierten Schlamm wieder zu, um bei sehr hohen Raumbelastungen teilweise die Säurekonzentration des Frischschlammes zu erreichen oder zu übertreffen (Tab. 12, Abb. 12). Im Gegensatz dazu stellte sich bei den beiden Grenztemperaturen von 22°C und 60°C bereits bei höheren Aufenthaltszeiten eine relativ hohe Gleichgewichtskonzentration flüchtiger Säuren ein, die erheblich über der bei den anderen Temperaturen fermentierten Schlämme lag (Tab. 12, Abb. 12).

Vorherrschende flüchtige Säuren im fermentierten Schlamm waren Essigsäure und Propionsäure, erst bei sehr niederen Verweilzeiten bzw. höherer Belastung waren auch höherkettige (C_4 - C_6) Säuren nachzuweisen, die im Gegensatz zu Frischschlamm jedoch hauptsächlich in der Iso-Form vorlagen. Während mit Ausnahme von 60°C bei längeren Verweilzeiten Essigsäure die dominierende Säure darstellte, konnte es bei sehr kurzen Verweilzeiten zum Dominieren von Propionsäure kommen, wie es bei 50°C ausnahmslos der Fall war (Tab. 13, Abb. 12).

Die bei einer Verweilzeit von 3 Tagen untersuchte Dynamik flüchtiger organischer Säuren während eines Fütterungsintervalls ergab sowohl bei 35°C als auch bei 60°C eine Zunahme der Gesamtsäurekonzentration auf etwa das Doppelte (35°C: Faktor 2,5, 60°C: Faktor 1,8) ca. 3 bis 4 Stunden nach Zugabe von frischem Substrat sowie einen darauf folgenden langsamen Abfall bis auf den Anfangswert (Tab. 14, Abb. 13). Während jedoch bei 35°C die höchsten Konzentrationen von Essigsäure und Propionsäure nach etwa 3 Stunden gleichzeitig erreicht wurden, lagen bei 60°C die Maxima von Essig- und Propionsäure aufgrund der

Tab. 14: Dynamik flüchtiger organischer Säuren während eines Fütterungsintervalls
Schlammcharge 3, Verweilzeit 3 Tage,
Raumbelastung 10,7 g oTS/1·Tag

Zeit nach Substrat-zugabe Std.	Ges.Säuren mMol/l		Essigsäure mMol/l		Propionsäure mMol/l	
	35°C	60°C	35°C	60°C	35°C	60°C
0,1	16,5	29,3	9,4	12,5	5,0	11,8
0,5	23,5	34,0	12,8	15,0	6,5	12,6
1	27,8	37,0	14,9	16,7	7,1	12,6
2	38,2	43,7	18,8	19,7	10,4	13,6
3	34,3	53,5	16,6	24,5	9,4	15,8
4	34,3	48,2	16,2	22,8	10,1	14,7
5	37,7	50,1	18,6	23,1	8,8	15,6
6	31,7	52,0	14,5	21,0	8,8	18,0
7	34,0	48,5	16,8	21,0	9,9	16,0
9	26,0	50,3	12,2	18,0	8,5	18,0
20	15,8	37,3	6,0	10,8	6,0	17,4
22	14,0	35,0	5,4	10,8	5,6	15,7
24	11,5	33,0	5,4	9,5	5,1	15,4

wesentlich langsameren Zunahme von Propionsäure ungefähr 9 Stunden auseinander (Tab. 14, Abb. 13).

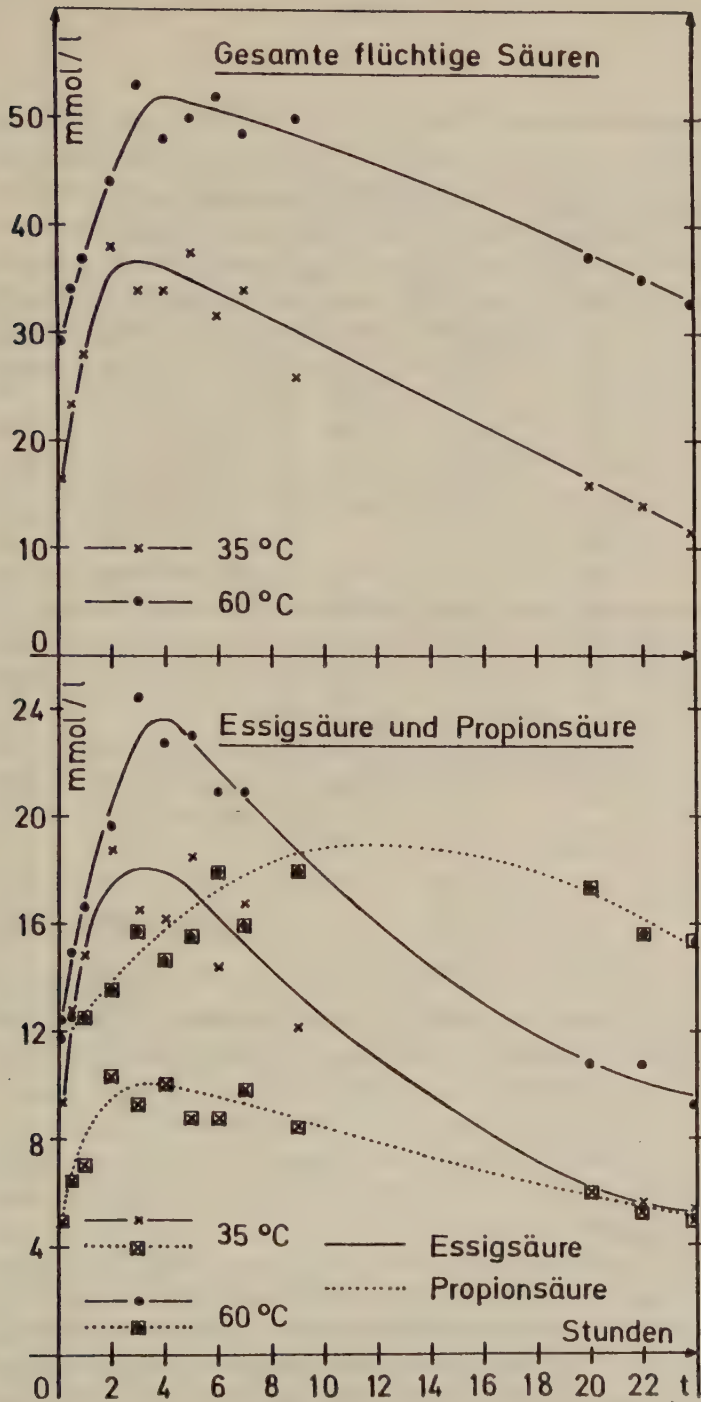


Abb. 13: Dynamik flüchtiger organischer Säuren während eines Fütterungsintervalls

Verweilzeit: 3 Tage; Schlammcharge 3

Tab.15: pH-Wert des fermentierten Schlammes

Schlamm-charge	Ferm.-temp. °C	mittlere Schlammverweilzeit				
		3 Tage	4 Tage	5 Tage	7 Tage	11 Tage
1	35	7,05	7,15	7,20	7,25	7,30
	50	7,25	7,30	7,35	7,40	7,50
	60	7,40	7,45	7,50	7,55	7,60
2	35	7,00	7,15	7,25	7,30	7,35
	50	.	.	7,30	7,40	7,50
	60	7,30	7,45	7,50	7,60	7,65
3	35	7,15	7,25	.	.	7,30
	50	7,20	7,30	.	.	7,50
	60	7,35	7,45	.	.	7,50
4	22	6,45	6,90	7,00	7,05	7,20
	28	6,65	7,00	7,10	7,20	7,30
	35	7,20	7,25	7,30	7,35	7,45
	40	7,20	7,30	7,35	7,40	7,50
	45	7,20	7,30	7,35	7,45	7,55
	50	7,05	7,30	7,40	7,50	7,55

1.6. pH - Wert

Der pH-Wert im fermentierten Schlamm war von der Fermentations-temperatur, dem verwendeten Klärschlamm und der Raumbelastung (Verweilzeit) abhängig. Bei einer mittleren Schlammverweilzeit von 11 Tagen ergaben sich bei 35°C pH-Werte von 7,30 - 7,45,

bei 50°C von 7,50 - 7,55 und bei 60°C von 7,50 - 7,65. Mit sinkenden Temperaturen nahm der pH-Wert bei allen Temperaturen, entsprechend geringerer NH_3/NH_4 - Konzentrationen und einem höheren Gehalt flüchtiger organischer Säuren, im fermentierten Schlamm ab; pH-Werte unter 7,0 waren allerdings nur bei sehr niedrigen Verweilzeiten von 3 Tagen festzustellen und beschränkten sich auf die niederen mesophilen Temperaturen von 28°C und 22°C (Tab. 15).

2. Kartoffelschlempe und Schweinegülle

Für die Versuche kamen Fermenter mit einem Füllvolumen von 4,5 l zum Einsatz, die zunächst mit Klärschlamm als Fermentationssubstrat halbkontinuierlich betrieben wurden. Die Umstellung auf Schlempe bzw. Schweinegülle als Gärsubstrat erfolgte unter Beibehaltung der mittleren Verweilzeit und der Fermentationstemperatur. Betrieb der Fermenter, Probenahme sowie Analysendurchführung waren analog den Versuchen mit Klärschlamm als Substrat.

Kartoffelschlempe

Mit Schlempe als Substrat waren stabile Fermentationen im thermophilen Temperaturbereich (56°C) möglich. Sowohl die Abbauleistungen als auch die produzierten Gasmengen entsprachen weitgehend denen mit Klärschlamm als Gärsubstrat (Tab. 16); prinzipiell gleich war auch die Kinetik der Gasproduktion während eines Fütterungsintervalls. Der Abbau der organischen Trockensubstanz betrug bei Schlempe 54 %; pro Liter Fermentervolumen und Tag wurden 745 ml Gas mit einem Methananteil von 65 % erzeugt. Der Gehalt an NH_3/NH_4 -Stickstoff lag bei 810 mg N/l (130 mg/l freies Ammoniak); Proteine wurden zu etwa 30 % abgebaut. Die in frischer Schlempe in sehr hohen Konzentrationen vorliegende Milchsäure (ca. 26 % der oTS) wurde bei der gewählten Haltezeit von 22,5 Tagen vollständig

Tab. 16: Leistungsdaten der Kartoffelschlempe-Fermentation
Verweilzeit 22,5 Tage; Raumbelastung 1,5 g oTS/l·Tag
Fermentationstemperatur 56 °C

oTS		CSB		Protein	
g/l	% Abbau	g O ₂ /l	% Abbau	g/l	% Abbau
16	54	27,5	50	8,75	30
NH ₃ /NH ₄ ⁺ mg N/l		freies NH ₃ mg N/l	flücht.Säuren mmol/l	pH-Wert	
0,81	0,13	55,3	7,3 - 7,4		
Gasproduktion					
l Gas/l·Tag	ml Gas / 1g oTS		Methangehalt %		
	zugegeben	abgebaut			
0,745	490	910	65		

umgesetzt. Im Vergleich hierzu nahm der Gehalt an flüchtigen organischen Säuren während der Fermentation beträchtlich zu; auffällig war die mit 44 mmol/l sehr hohe Konzentration an Propionsäure, die ungefähr 80 % der Gesamtsäuren ausmachte.

Wie die bereits bei Raumbelastungen von 1,5 g oTS/l·Tag (Verweilzeit 22,5 Tage) hohen Konzentrationen der flüchtigen organischen Säuren andeuten, scheint eine Fermentation von Kartoffelschlempe bei sehr hohen organischen Belastungen (> 5 g oTS/l·Tag) -zumindest im thermophilen Bereich- nicht möglich zu sein.

Schweinegülle

Mit Schweinegülle als Substrat waren stabile Fermentationen im thermophilen Temperaturbereich nicht möglich. Unabhängig von der gewählten organischen Belastung (22,5 Tage: 2,35 g oTS/1·Tag; 45 Tage: 1,2 g oTS/1·Tag) erfolgte bei thermophilem Betrieb bereits wenige Tage nach Beschickung der Fermenter mit Schweinegülle ein Abfall der Gasproduktion (Abb. 14). Dieser Trend hielt bis zur Einstellung der täglich vorgenommenen Fütterung nach 15 bzw. 20 Tagen an.

Die produzierte Gasmenge belief sich bei Beendigung des Versuches nach 30 Tagen auf ca. 30 ml Gas/1·Tag, eine Erholungstendenz war nicht erkennbar. Die Analyse des nach Aussetzen der Fütterung produzierten Gases ergab einen Methananteil von 66,5 %, 33 % des Gases bestanden aus CO_2 und die restlichen 0,5 % aus Schwefelwasserstoff; Ammoniak und Wasserstoff waren nicht im Gas enthalten. Der Gehalt flüchtiger organischer Säure nahm während der Versuchsperiode stetig zu. Bei Fütterungsende wurden Gesamtkonzentrationen von etwa 100 mmol/l erreicht, von denen über 50 % auf Essigsäure entfielen.

Trotz der relativ hohen Säurekonzentration blieb der pH-Wert deutlich über 7, zurückzuführen auf den sehr hohen Ammoniakgehalt von Schweinegülle. Durch die tägliche Substratzufuhr wurde eine Akkumulierung des bereits in frischer Schweinegülle in Konzentrationen von 3900 mg N/l enthaltenen NH_3/NH_4 -Stickstoffs herbeigeführt - zusammen mit dem pH-Wert von 7,6 und der Fermentationstemperatur von 56°C ergab dies einen rechnerisch ermittelten Wert von 465 mg freiem Ammoniak pro Liter Fermentervolumen bei Einstellung der Fütterung nach 15 Tagen (22,5 Tage Verweilzeit). Bei Abfall der Gasproduktion etwa 3 Tage nach Umstellung des Fermenterbetriebs auf Schweinegülle (22,5 Tage Verweilzeit) belief sich die Konzentration an freiem Ammoniak auf ca. 270 mg/l, etwa der gleiche Wert (ca. 285 mg NH_3 /l) wurde bei Nachlassen der Gasproduktion im zweiten Versuchsansatz (45 Tage Verweilzeit) erreicht.

Mit der gleichen Charge von Schweinegülle waren im mesophilen

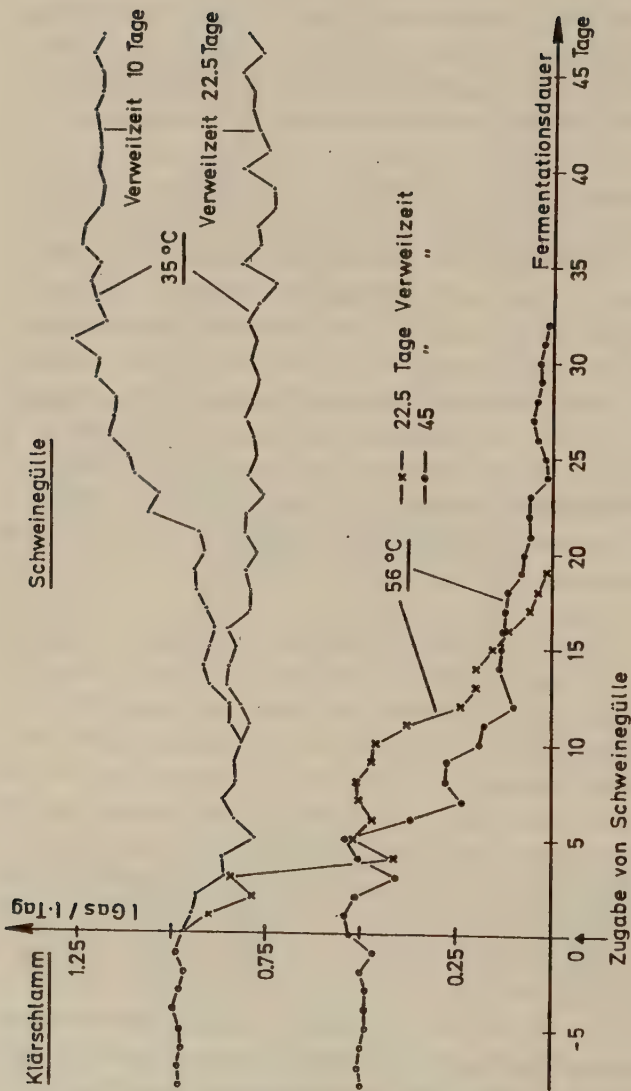


Abb. 14: Verlauf der Gasproduktion während der Schweinegülle-Fermentation

Raumbelastung: 1,2 g OTS/l · Tag (45 Tage)

Raumbelastung: 2,4 g OTS/l · Tag (22,5 Tage)

Raumbelastung: 5,3 g OTS/l · Tag (10 Tage)

Temperaturbereich stabile Fermentationen bei Verweilzeiten von 22,5 Tagen (Raumbelastung 2,35 g oTS/l·Tag) und 10 Tagen (Raumbelastung 5,3 g oTS/l·Tag) möglich (Abb. 14).

Verglichen mit Klärschlamm als Fermentationssubstrat, waren bei entsprechenden Verweilzeiten und Raumbelastungen sowohl die Abbauleistungen als auch die Gasproduktion erheblich geringer (Tab. 17). Auffälligster Unterschied war ein drastischer Rückgang der Abbauleistung bei Verkürzung der Verweilzeit von 22,5 Tagen (oTS-Abbau: 40 %) auf 10 Tage (oTS-Abbau: 29 %). Das unterschiedliche Abbauverhalten wird besonders deutlich bei einem Vergleich der Geschwindigkeitskonstanten. Wie aus Abb. 15 ersichtlich, ergab sich für Schweinegülle bis zu der höchsten überprüften Haltezeit von 22,5 Tagen eine annähernd lineare Beziehung zwischen Abbau der oTS und Verweildauer mit gleichmäßigem Gärungsverlauf, jedoch relativ geringen Umsatzraten. Die Geschwindigkeitskonstante k_1 für Schweinegülle lag bei 0,04 und war damit um den Faktor von 5 geringer als die bei der gleichen Temperatur für Klärschlamm als Substrat ermittelte Konstante k_1 (Tab. 18).

Berücksichtigt man nur den biologisch abbaubaren Teil der organischen Fraktion, der in Schweinegülle mit 51 % der GesamtoTS relativ gering war (Tab. 17), so betrug der Abbaugrad bei einer Verweilzeit von 10 Tagen knapp 60 % (Klärschlamm: 75 %) und bei 22,5 Tagen ähnlich wie bei Klärschlamm - etwa 80 %; ähnliches trifft für die bei den angegebenen Verweilzeiten produzierte Gasmenge zu.

Das mit einem oTS-Anteil von 10 % in Schweinegülle enthaltene Fett wurde bei 10-tägiger Verweilzeit zu 42 % abgebaut. Der Fettabbau nahm bei der höheren Verweilzeit nur mehr unerheblich zu, selbst nach 5-monatiger Fermentationsdauer (Ausfäulversuche) wurden nicht mehr als 54 % umgesetzt.

Der Abbau von Proteinen (40 % oTS-Anteil) erfolgte äußerst langsam. Bei annähernd gleichbleibenden $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ -Konzentrationen von 3900 - 4050 mg N/l (295 mg NH_3 /l freies Ammoniak) war bis zu Verweilzeiten von 22,5 Tagen nur ein minimaler Proteinabbau (ca. 2,5 %) festzustellen. Der sich bei den Ausfäulversuchen einstellende Endwert von 4700 mg N/l entsprach einem Proteinabbau von etwas über 20 %, die dabei in der vergorenen

Tab.17: Leistungsdaten der Schweinegülle-Fermentation
 Fermentationstemperatur: 35°C
 Raumbelastung: 2.4 g oTS/l · Tag (22,5 Tage)
 Raumbelastung: 5.3 g oTS/l · Tag (10 Tage)

Verweilzeit (Tage)	oTS		Fett		Protein	
	g/l	% Abbau	g/l	% Abbau	g/l	% Abbau
10	37,5	29	3,0	41	-	-
22,5	32	40	2,9	43	20,5	2,5
5 Monate ¹⁾	26	51	2,3	55	16	23
	NH ₃ /NH ₄ ⁺ mg N/l	freies NH ₃ mg N/l	flücht.Säuren mmol/l		pH-Wert	
10	3,9	227	49,5		7,65	
22,5	4,1	295	18,5		7,8	
5 Monate ¹⁾	4,7	571	1,5		8,0	
	Gasproduktion					
	ml Gas/l·Tag	ml Gas/1g oTS		Methangehalt %		
		zugegeben	abgebaut			
10	1 205	227	785	69 - 70		
22,5	795	338	852	69 - 70		
5 Monate ¹⁾	21 000 2)	396	777	-		

1) Standversuche

2) 1 Gas/l Füllvol.×5 Monate

Tab.18: Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten bei Schweinegülle als Fermentationssubstrat
 Fermentationstemperatur: 35°C

Verweilzeit Tage	$\frac{S_0 - S_t}{S_t}$	RG Konstante k
10	0,413	0,04
22,5	0,656	0,02

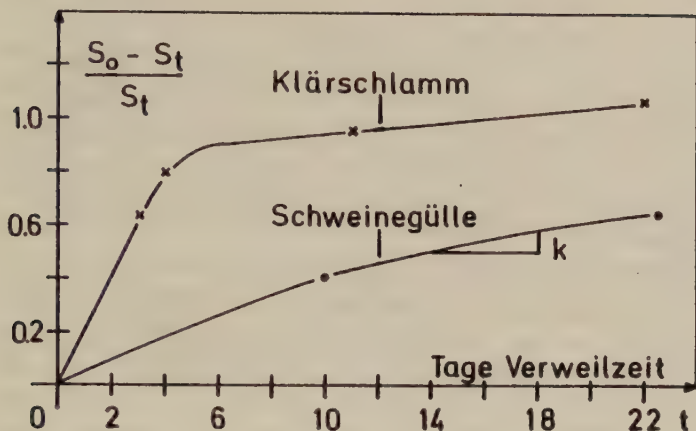


Abb. 15: Beziehung zwischen Fermentationsdauer und dem Abbau der organischen Substanz bei Schweinegülle und Klärschlamm als Substrat

Fermentationstemperatur: 35°C

Gülle erreichte Konzentration an freiem Ammoniak machte ca. 570 mg/l aus (Tab. 17). Milchsäure konnte ebenso wie die anderen nichtflüchtigen organischen Säuren weder in frischer noch in vergorener Gülle nachgewiesen werden, das gleiche trifft für Äthanol zu. Die bereits in frischer Gülle in sehr hohen Konzentrationen (162 mmol/l, Tab. 2) vorliegenden flüchtigen organischen Säuren wurden bei den gewählten Verweilzeiten nur unvollständig abgebaut. Die Konzentrationen betrugen ca. 19 mmol/l bei einer Verweilzeit von 22,5 Tagen und ca. 50 mmol/l bei 10 Tagen (Tab. 17), vorherrschende Säure war Essigsäure. Der Methangehalt des Gases lag bei 69 - 70 %, das Restgas bestand aus CO₂ (30 - 31 %) und geringen Mengen H₂S (< 0,5 %).

Die Kinetik der Gasproduktion während eines Fütterungsinter-

valls zeigte einen im Vergleich zu Klärschlamm anderen Verlauf (Abb. 16). Bei beiden Verweilzeiten erfolgte nach Zugabe von frischer Schweinegülle ein nur minimaler Anstieg der Gasproduktion mit daran anschließender sehr langsamer Abnahme auf den schon hohen Ausgangswert; die über mehrere Stunden praktisch gleichbleibende Gasproduktionsrate deutet Substratsättigung der für die Gasbildung verantwortlichen Enzymsysteme an.

Der wegen der hohen Konzentration an $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ - Stickstoff bereits in Frischgülle sehr hohe pH-Wert von 7,5 stieg während der Gärung nur mehr unwesentlich auf 7,65 (10 Tage Verweilzeit) bzw. 7,75 (22,5 Tage Verweilzeit) an.

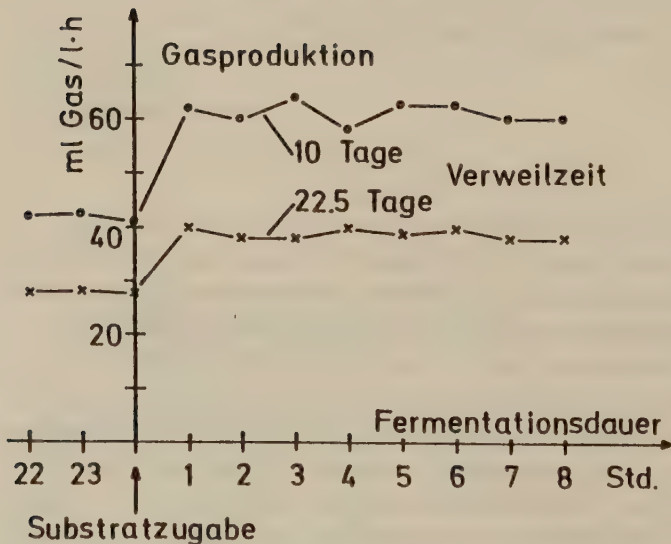


Abb. 16: Kinetik der Gasproduktion innerhalb eines Fütterungsintervalls
Substrat: Schweinegülle
Fermentationstemperatur 35°C

3. Diskussion

Nach unseren Versuchsergebnissen ist ein Vorteil thermophiler Klärschlammbehandlung, sowohl was den Abbau der organischen Substanzen wie auch die produzierte Gasmenge angeht, über einen weiten Belastungsbereich nicht gegeben. Die optimistischen Erwartungen, infolge höherer Durchsatzraten und einer Steigerung der Belastbarkeit bei thermophilen Fermentationstemperaturen zu Kosteneinsparungen auf dem Investitionssektor (geringere Faulraumvolumina) zu kommen, haben sich somit nicht bestätigt.

Bei nahezu identischen Fermentationsleistungen zwischen 35°C und 60°C bis zu Raumbelastungen von etwa 8 g oTS/l·Tag wären Leistungsvorteile im oberen thermophilen Bereich (60°C) erst bei sehr hohen organischen Belastungen von über 10 g oTS/l·Tag zu erwarten. Diese Aussage deckt sich mit den Ergebnissen von Shelef (1979), der bei Gärversuchen mit Rindergülle als Substrat die Raumbelastungen bis ca. 20 g oTS/l·Tag steigerte und ebenfalls erst ab etwa 10 g oTS/l·Tag einen Vorteil (höhere Gasproduktion) thermophiler Prozeßführung feststellte. Raumbelastungen dieser Größenordnung dürften allerdings wegen des im Vergleich zu Gülle geringeren Gehaltes an organischer Substanz im Klärschlamm auf landwirtschaftliche Biogasanlagen beschränkt sein. Abgesehen davon, könnten bei Raumbelastungen von etwa 10 g oTS/l·Tag, wie sie mit Klärschlamm bei einer mittleren Schlammverweilzeit von 3 Tagen noch zu erreichen sind, die Anforderungen, die an die anaerobe Klärschlammbehandlung als Stabilisierungsverfahren gestellt werden, nicht mehr hinreichend erfüllt werden. Hinzu kommt eine verminderte Betriebssicherheit im Belastungsbereich, was eine thermophile Schlammbehandlung in kommunalen Kläranlagen bei sehr hohen organischen Belastungen ebenfalls ausschließt. Wohl aber wäre nach unseren Untersuchungen eine Verkürzung der -wie die derzeitige Schlammbehandlungspraxis in der BRD und in Bayern (Wolf, 1983; Abb. 17) zeigt- im Durchschnitt sehr hohen Schlammverweilzeiten auf mindestens 10 Tage ohne Einbuße an Betriebssicherheit und bei ausreichendem Stabilisierungsgrad des Faulgutes (technische Faulgrenze) möglich,

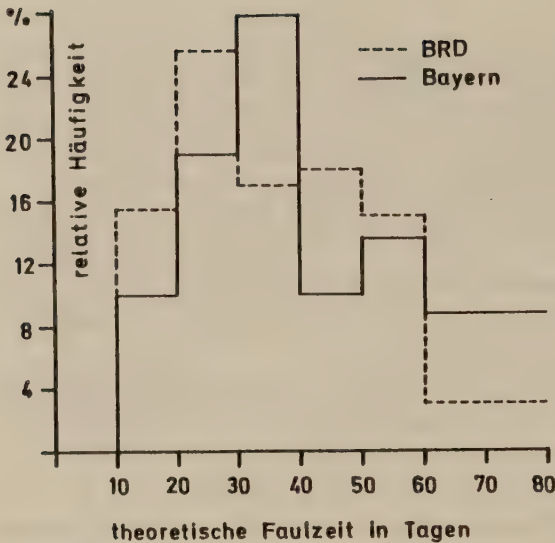


Abb. 17: Verteilung der in der Praxis angewandten Faulzeiten bei Schlammfaulräumen in Abwasserkläranlagen (Wolf, 1983).

wodurch unnötig große Faulräume vermieden und die Investitionskosten erheblich gesenkt werden könnten.

Die bei einer Verweilzeit von 10 Tagen in Frage kommende Fermentationstemperatur wäre wegen nahezu gleicher Gärleistungen im meso- und thermophilen Bereich vom angestrebten Zweck (Hygienisierung, Konditionierung) bestimmt, sollte allerdings nicht unter 30°C liegen. Was die Stabilisierung betrifft, ist ein Abfall der Fermentationsleistung zwischen 35°C und 45°C nicht zu erwarten. Wie unsere Ergebnisse zeigen, kann sich bei ausreichender Adaptationszeit auch in diesem Temperaturbereich eine leistungsfähige Bakterienflora einstellen; das von Fair u. Moore (1937) beschriebene "Leistungsloch" bei etwa 40° trat in unseren Versuchen nicht auf.

Dagegen erscheint eine Verweilzeit/Temperatur-Kombination von 10 Tagen und 60°C wegen des geringeren Ausfaulungsgrades der im oberen thermophilen Bereich bei längeren Haltezeiten fermentierten Schlämmen nicht vorteilhaft. Der geringere Stabilisierungsgrad bei 60°C ging -bei gleichem Gehalt des Faulschlam-

mes an organischer Trockensubstanz- parallel mit höheren CSB- und BSB₅-Werten, was auf einen geringeren Abbau der in frischem Klärschlamm vorhandenen reduzierten Verbindungen schließen läßt; die gleiche Deutung läßt auch die im Vergleich zu den anderen Fermentationstemperaturen geringere Gasproduktion pro Gramm abgebauter oTS zu.

Wie ein Vergleich der Fettabbauraten zeigt, unterliegen offensichtlich Fette bei 60°C einem relativ langsamen Abbau, möglicherweise können bestimmte Fettfraktionen in diesem Temperaturbereich auch überhaupt nicht umgesetzt werden (keine weitere Zunahme der Fettabbauraten bei Verdoppelung der Verweilzeit von 11 auf 22 Tage).

Wie aus den Versuchsergebnissen hervorgeht, steht dem langsameren bzw. geringeren Fettabbau bei 60°C ein rascherer Abbau von Proteinen gegenüber. Diese Unterschiede im Abbauverhalten der beiden wichtigsten organischen Klärschlammkomponenten wurden auch von anderen Autoren (Heukelekian, 1930; Maly u. Fadrus, 1971; Garber, 1975) beobachtet. Die Aussage: Schnellerer Protein- und langsamerer Fettumsatz im oberen thermophilen Bereich (bei 50°C nur angedeutet) wurde somit für Klärschlammfermentationen bestätigt.

Mit ein Grund für die geringere Stabilisierung bzw. den verlangsamten Fettabbau könnte der hohe Gehalt des bei thermophilen Temperaturen fermentierten Schlammes an freiem Ammoniak sein, das nach Untersuchungen von Mc Carty und Mc Kinney (1961) als hemmendes bzw. toxisches Agens auf den Fermentationsprozeß wirkt. Die von den Autoren mit 150 mg/l angegebene kritische Ammoniakkonzentration wurde bei unseren Gärversuchen mit 220 mg/l bei 60°C deutlich überschritten, auch bei 50°C lag das Ammoniak (180 mg/l) bei Charge 4 (hoher Proteingehalt) in höherer Konzentration vor. Obwohl, wie aus unseren Versuchen hervorgeht, bei den angegebenen Ammoniakgehalten noch stabile Fermentationen möglich sind -womit zugleich eine Grenzkonzentration von 150 mg/l NH₃/l widerlegt ist- wäre doch zumindest ein hemmender Effekt von Ammoniak auf die fettabbauende Bakterienflora denkbar, so wie er bereits für fettsäureverwertende Keime (Van Velsen, 1979) beschrieben ist. Der von van Velsen registrierte verlangsamte Umsatz flüchtiger organischer

Säuren nach hohen Ammoniak-Gaben könnte auch eine Erklärungsmöglichkeit für die selbst bei längeren Verweilzeiten relativ hohen Konzentrationen des bei 60°C fermentierten Schlammes an flüchtigen Säuren sein.

Ein im Vergleich zu Klärschlamm wesentlich höherer Gehalt an $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ - Stickstoff (und damit auch an freiem Ammoniak) in Schweinegülle sollte bei erster Betrachtung auch der Grund für die Nichtvergärbarkeit dieses Substrates im thermophilen Bereich sein, so wie es bereits in früheren Untersuchungen (Van Velsen, 1979) festgestellt wurde. Daß bei unseren Versuchen mit der gleichen Charge von Schweinegülle im mesophilen Bereich (35°C) stabile Fermentationen möglich waren, läßt die Vermutung zu, verantwortlich für das Mißlingen einer thermophilen Vergärung von Schweinegülle wäre nicht die Gesamtkonzentration des $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ - Stickstoffs, sondern der bei thermophilen Temperaturen höhere Anteil an freiem Ammoniak. Vergleicht man jedoch die Ammoniakkonzentrationen, wie sie bei Abfall der Gasproduktion bei thermophilem Betrieb vorlagen (270 bzw. 285 mg/l) mit denen bei mesophilem Betrieb unter Gleichgewichtsbedingungen (295 mg NH_3 /l), stellt man fast identische Gehalte fest. Dies läßt den Schluß zu, daß womöglich eine größere Empfindlichkeit der thermophilen Bakterienflora bzw. einzelner Keimgruppen gegenüber Ammoniak vorliegt, vorstellbar wäre auch eine im Vergleich zur mesophilen Flora höhere Sensibilität gegenüber anderen in Schweinegülle enthaltenen Substanzen wie Phenole, Sketole, Mercaptane etc.

Wie das Aussetzen der Gasproduktion bei gleichzeitigem Vorhandensein von Essigsäure im Medium zeigt, dürfte auf jeden Fall eine Schädigung der acetatverwertenden methanogenen Bakterien vorliegen; diese physiologische Schädigung ließ sich auch lichtmikroskopisch in Form von drastischem Ausblasen der ansonsten stark fluoreszierenden Sarcinenklumpen nachzuweisen.

Gegen die Version einer Ammoniak-Vergiftung und für die Wahrscheinlichkeit anderer toxischer Agenzien in Schweinegülle spricht die erfolgreiche Vergärung von Rindergülle bei Temperaturen bis zu 60°C (Varel et al., 1977; Mackie u. Bryant,

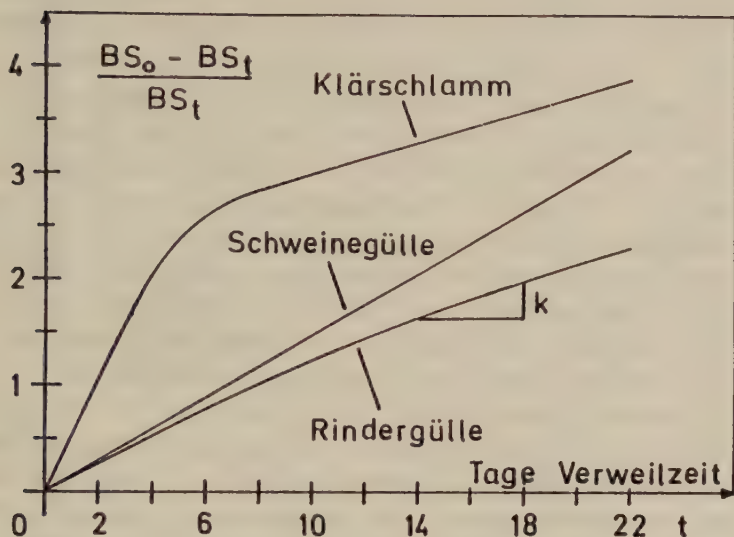


Abb. 18: Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten bei verschiedenen Fermentationssubstraten
 Fermentationstemperatur: 35°C
 BS: biologisch abbaubarer Teil der oTS

1981), obwohl Konzentrationen an freiem Ammoniak auftraten (400 - 500 mg NH_3/l), wie sie bei unseren Versuchen mit Schweinegülle nicht annähernd erreicht wurden.

Wie ein Vergleich von Klärschlamm, Rinder- und Schweinegülle als der wichtigsten in der Praxis eingesetzten Fermentationssubstrate zeigt, ist die biologisch abbaubare Fraktion der in diesen Substraten enthaltenen organischen Masse unterschiedlich hoch. Nach unseren Untersuchungen können ca. 65 % der sich in Klärschlamm und etwas über 50 % der in Schweinegülle enthaltenen oTS umgesetzt werden, während der praktisch erzielbare Abbaugrad von Rindergülle zwischen 51 und 59 % (Jewell, 1978; Shelev, 1979) der oTS liegt. Mehr noch als im Anteil der abbaubaren organischen Fraktion unterscheiden sich die Gärsubstrate jedoch in der Geschwindigkeit, mit der diese Fraktion abgebaut wird. Wie aus Abb. 18 hervorgeht, weist

hierbei Klärschlamm die mit Abstand höchsten Umsatzraten auf, zurückzuführen auf einen großen Anteil leicht abbaubarer Stoffe, die, wie der relativ scharfe Knick im Kurvenverlauf andeutet (Abb. 18), bereits nach einigen Tagen Fermentationsdauer umgesetzt sind. Diese überaus hohe Effizienz des Gärprozesses bei niederen Verweilzeiten (Fermentationstemperaturen zwischen 35°C und 60°C) ist auch der Grund dafür, daß ein ausreichender Stabilisierungsgrad von Klärschlamm (technische Faulgrenze) bereits bei verhältnismäßig niederen Haltezeiten von 7 - 10 Tagen erreicht ist. Die noch verbleibende organische Substanz wird nur sehr langsam (niedere RG - Konstante k_{II}) mit einer Geschwindigkeit, die der von Rindergülle ähnelt, abgebaut. Die Ursache für die niedrigen RG - Konstanten von Rinder- und Schweinegülle ist darin zu sehen, daß diese Substrate nur mehr das relativ langsam bzw. schlecht zersetzbare organische Material der aufgenommenen Nahrung beinhalten, das im Gegensatz zu den leicht verwertbaren Stoffen nicht im Pansen und Netzmagen (Rind) oder im Magen - Darm - Trakt (Schwein) umgesetzt bzw. resorbiert werden konnte. Sowohl Rinder- wie auch Schweinegülle stellen deswegen wesentlich schlechtere Fermentationssubstrate dar als Klärschlamm, wobei Schweinegülle im Vergleich zu Rindergülle trotz der hohen Gehalte an NH_3/NH_4^+ - Stickstoff und möglicherweise anderer den Fermentationsprozeß hemmender Agenzien die noch etwas besseren Abbaueigenschaften aufweist.

Der Gehalt schnell abbaubarer organischer Stoffe in Klärschlamm ist auch der Grund für die sehr hohen Gasproduktionsraten nach Zugabe von frischem Material (Abb. 8 u. 13), sowie den starken Anstieg der flüchtigen Säuren, bedingt durch die spontan einsetzende Aktivität der fermentativen Keime. Im Vergleich dazu ist - bei ähnlicher Versuchsdurchführung und organischer Belastung - die Zunahme flüchtiger Säuren in Rindergülle verhältnismäßig gering (Mackie u. Bryant, 1981), was den niederen Gehalt rasch umzusetzender Substanzen in Rindergülle bestätigt.

Wie der deutliche Rückgang der Gasproduktionsraten bei gleichzeitig weiterer Zunahme der Essigsäurekonzentration andeutet (Abb. 19), sollte ein Großteil des während der ersten 2 bis 3

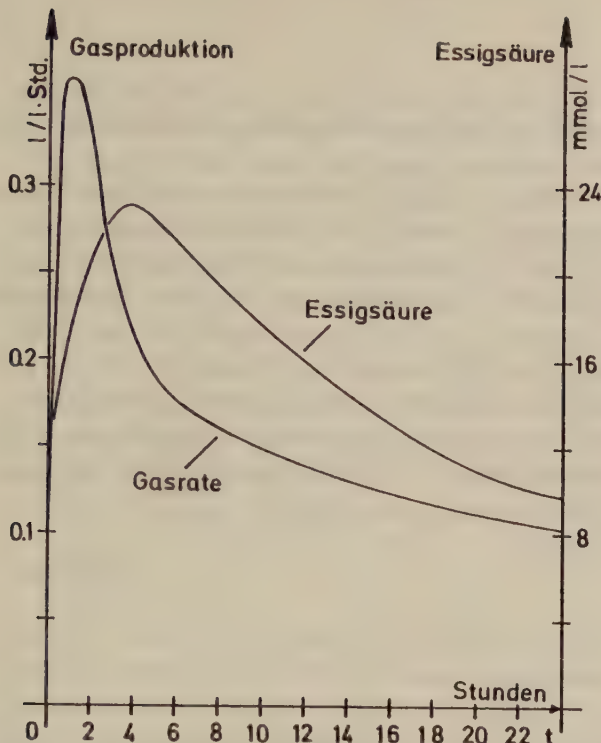


Abb. 19: Gasraten und Essigsäure-Konzentrationen im Verlauf eines Fütterungsintervalls
 Fermentationstemperatur: 60°C, Verweilzeit: 3 Tage,
 Substrat: Schlammcharge 3

Stunden eines Fütterungsintervalls gebildeten Methans durch Reduzierung von CO_2 mit Wasserstoff ($4 \text{ H}_2 + \text{CO}_2 \longrightarrow \text{CH}_4 + 2 \text{ H}_2\text{O}$) und nur ein relativ geringer Anteil durch Disproportionierung von Essigsäure entstanden sein. Die im Gegensatz zu den anderen Temperaturen bei 60°C bis zu Raumbelastungen von etwa 10 g oTS/l · Tag annähernd proportionale Zunahme der Gasproduktionsraten gibt zu der Annahme Anlaß, daß das Enzymsystem, das die Methanbildung aus CO_2 und H_2 katalysiert, in diesem Temperaturbereich selbst bei den hohen organischen Belastungen noch nicht gesättigt ist. Eine Erhöhung der Raumbelastung auf über 10 g oTS/l · Tag sollte nach diesen Befunden Leistungsvorteile (höhere Gasproduktion) von Fermentationen im oberen thermophilen Bereich erwarten lassen.

Wenn das Hauptanliegen der Fermentation eine möglichst hohe Gasausbeute ist, könnte durch eine Modifikation des Betriebsmodus die Durchsatzrate des Faulgutes erhöht und die Methan-

produktion (1 Gas/l·Tag) womöglich weiter gesteigert werden. Denkbar wäre ein kontinuierlicher Fermenterbetrieb oder eine Version des halbkontinuierlichen Betriebs, wobei nicht nur einmal, sondern mehrmals täglich in kürzeren Abständen frisches Substrat zugeführt werden könnte. Da im Gegensatz zur Methanproduktion aus H_2 und CO_2 die Enzyme, die die Umsetzung von Acetat zu Methan und CO_2 katalysieren, bereits bei Belastungen unterhalb 10 g oTS/l·Tag einer Sättigung unterliegen, würde eine weitere Steigerung der organischen Belastung zu einer noch verstärkten Akkumulation von Essigsäure (und anderen flüchtigen Säuren) mit der möglichen Folge einer Übersäuerung des Fermenterinhaltcs führen. Zur Verhinderung von Problemen dieser Art wäre eine pH-Wert gesteuerte Regulation der Substratzufuhr vorstellbar.

8. Gärversuche mit zwei hintereinandergeschalteten Fermentern

In den folgenden Versuchen sollte überprüft werden, ob durch Erhöhung der Mindestaufenthaltszeit des Faulgutes von 1 Tag (1 stufiger Fermenter) auf 2 Tage (2 hintereinandergeschaltete Fermenter) eine Verbesserung der Fermentationsleistungen erreicht werden kann.

Neben dem Betrieb der hintereinandergeschalteten Gärbehälter bei gleichen Fermentationstemperaturen (35°C bzw. 50°C) wurde auch die Möglichkeit einer Temperaturkombination thermophil (1. Gärbehälter) - mesophil (2. Gärbehälter) untersucht.

Ergebnisse

Ein Teil des bei mittleren Aufenthaltszeiten von 3, 4 und 5 Tagen fermentierten Klärschlamms wurde nach Entnahme aus dem Fermenter in einen zweiten Behälter (1 l Steilbrustflasche, 600 ml Füllvolumen) umgefüllt und dort einer weiteren Vergärung unterzogen. Ebenso wie die Fermenter wurde auch der nachgeschaltete Faulbehälter halbkontinuierlich bei konstanter Temperatur betrieben, die Durchmischung des Faulgutes erfolgte mittels Magnetrührer. Die täglichen Messungen umfaßten die produzierte Gasmenge sowie den pH-Wert. Zur Ermittlung der Abbauleistung wurde in einigen Fällen nach Einstellung des Gleichgewichtszustandes die organische Trockensubstanz bestimmt. Die Verweilzeitkombinationen der hintereinandergeschalteten Gärbehälter waren (Fermenter zuerst genannt) 5 Tage - 2 Tage, 4 Tage - 2 Tage und 3 Tage - 2 (3) Tage.

Wie aus Tab. 19 ersichtlich, war bei keiner der Temperatur - Verweilzeit - Kombinationen die Gesamtmenge des pro Volumeneinheit erzeugten Gases (Summe aus erstem und zweitem Fermentationsbehälter) höher als die bei gleicher Aufenthaltszeit im 1-stufig betriebenen Fermenter. Im Vergleich zu einstufiger Prozeßführung wurde mit den Verweilzeitkombinationen 4 Tage - 2 Tage sowie 5 Tage - 2 Tage etwa die gleiche Gasmenge, mit der Verweilzeitkombination 3 Tage - 2 Tage dagegen um ca. 10 %

Tab. 19: Gasproduktion und oTS-Abbau bei ein- und zweistufiger Betriebsweise

Substrat: Schlammcharge 2 und Schlammcharge 3*

	Einstufig $F_I + F_{II}$		Einstufig $F_I + F_{II}$		Einstufig $F_I + F_{II}$	
Prozeßtemperatur (°C)	35	35 + 30	50	50 + 50	60	60 + 30
Verweilzeit (Tage)	7	5 + 2	7	5 + 2	•	•
Gasproduktion (lGas/Vol.xVerweilzeit)	14.910	14.670	15.330	15.250	•	•
oTS - Abbau (%)	45,5	44,5	48,5	48,5	•	•
Verweilzeit (Tage)	6	4 + 2	6	4 + 2	•	•
Gasproduktion (lGas/Vol.xVerweilzeit)	14.700	14.560	15.050	14.550	•	•
Verweilzeit (Tage) *	6	4 + 2			6	4 + 2
Gasproduktion (lGas/lVol.xVerweilzeit)	15.600	15.450	•	•	15.200	14.940
Verweilzeit (Tage)	5	3 + 2			6	3 + 3
Gasproduktion (lGas/lVol.xVerweilzeit)	14.250	12.640	•	•	15.120	14.290
oTS - Abbau (%)	43,5	39,5				

F_I : 1. Fermenter, F_{II} : 2. Fermenter

weniger Gas produziert, ähnliches trifft für den Abbau der organischen Substanz zu. Ein Grund für die etwas besseren Fermentationsleistungen bei 1-stufigem Betrieb könnte darin liegen, daß hier eine vergleichsweise größere Menge des Faulgutes eine längere Zeit den Fermentationsbedingungen ausgesetzt ist.

Die Schrittfolge thermophil (60°C, Fermenter) - mesophil (30°C, Gärflasche) erwies sich für den Praxisbetrieb als sehr problematisch. Erst nach mehrfachen Versuchen gelang es - unter anfangs häufigem Nachimpfen der Gärflaschen mit einer an 30°C adaptierten Bakterienflora - eine stabile Gasproduktion im Nachgärbehälter aufrechtzuerhalten. Die hierbei erzeugte Gasmenge war allerdings erheblich geringer (um über 50 %) als die in der zweiten Fermentationsstufe der

beiden anderen Temperaturkombinationen.

Insgesamt zeigen die Versuche, daß durch Erhöhung der Mindestaufenthaltszeit von 1 Tag auf 2 Tage keine Verbesserung der Fermentationsleistungen (oTS-Abbau, Gasproduktion) möglich ist.

C. Einfluß der Rührintensität auf die Fermentationsleistung

Ziel der modernen Klärtechnik ist es, den während der Abwasserreinigung anfallenden Klärschlamm bei möglichst geringem Energieaufwand mit möglichst hohen Umsatzraten ausreichend (technische Faulgrenze) zu stabilisieren.

Eine Steigerung der Abbaugeschwindigkeit konnte neben Erwärmung des Faulraum Inhaltes (mesophile Temperaturen) auch durch die Einführung von Schlammumwälzsystemen erreicht werden. Bei entsprechender Faulzeit kann dabei durch gute Umwälzung und Mischung des Faulraum Inhaltes der Abbau der organischen Substanz bis zu etwa 15 % (vgl. Roediger, 1967) zunehmen, zurückzuführen vor allem auf die Verhinderung der Schwimmdeckenbildung sowie die Vermeidung von Temperaturgradienten im Faulraum.

Bei unseren Versuchen sollte geklärt werden, ob Fermentationen im thermophilen Temperaturbereich einen im Vergleich zu mesophilem Betrieb unterschiedlichen Rührmodus verlangen; darüber hinaus sollten die Auswirkungen sehr hoher Rührgeschwindigkeiten auf die Fermentation untersucht werden.

Ergebnisse und Diskussion

Mit Klärschlammcharge 1 als Gärsubstrat wurde bei Temperaturen von 30°C, 50°C und 56°C und mittleren Verweilzeiten von 11 Tagen (Raumbelastung 2 g oTS/l · Tag) der Einfluß der Durchmischung des Faulgutes auf den Abbau der oTS und die Gasbildung untersucht. Bei kontinuierlicher Rührung wurde die Rührgeschwindigkeit von 75 bis 420 Upm variiert; bei intermittierender Rührung wurde jeweils 6x, 2x oder 1x täglich 15 Minuten lang bei einer Drehzahl von 270 Upm gerührt.

Wie aus Tab. 20 und Abb. 20 hervorgeht, wurden in beiden Temperaturbereichen die besten Leistungen bei kontinuierlicher Rührung von 75 Upm erreicht.

Die im Vergleich zu kontinuierlicher Rührung bis zu 10 % geringere Gasproduktion bei intermittierendem Rührbetrieb dürfte darauf zurückzuführen sein, daß ein Teil des organischen Materials, das am Aufbau der sich während der Rührpausen bildenden Schwimmdecke beteiligt ist, nicht mehr umgesetzt wird. Schwimmdeckenbildung sollte auch die Ursache für den periodischen Gasanfall bei intermittierendem Rührbetrieb (Abb. 21) sein.

Alle Fermentationsansätze erwiesen sich als relativ unempfindlich gegenüber den bei hohen Drehzahlen wirkenden Scherkräften. Selbst bei der höchsten Rührgeschwindigkeit von 420 Upm, die mit starker Schaumbildung des Gärinhalts verbunden war, kam es nur zu einem Rückgang der Gasproduktion von etwa 5 %. Die Zunahme der Konzentration flüchtiger organischer Säuren zeigt jedoch, besonders bei den thermophilen Temperaturen, den Übergang in einen weniger stabilen Zustand an. Grund für die zunehmende Säurekonzentration könnte eine leichte Schädigung der säureverwertenden Flora durch die hohen Scherkräfte sein, möglicherweise auch ein nur mehr ungenügender Kontakt zwischen den säurebildenden und säureverwertenden Keimen.

Ein höherer Gehalt flüchtiger Fettsäuren wurde auch während des intermittierend vorgenommenen Rührbetriebs festgestellt. Offenbar war hier mangels Turbulenzen kein hinreichender Austausch zwischen den Phasengrenzschichten mehr möglich, was

Tab. 20: Einfluß des Rührmodus auf die Fermentationsleistungen bei meso- und thermophilen Temperaturen
Substrat: Schlammcharge 1

Ferm.- temp. °C	Rührmodus	Gas/lxTag ml	Gas/1g oTS zugegeben ml	oTS Abbau %	CSB Abbau %	flüchtige Säuren mMol/l	
30 1)	kontinu- ierlich Upm	75	1020	500	44	44	0,4
		270	980	480	43	42,5	0,6
		420	960	470	-	-	1,8
	inter- mittierend 15 Min/Tag	2x	960	470	42,5	42,5	0,5
1x		960	470	41,5	42	0,6	
50 2)	kontinu- ierlich Upm	75	1040	510	46	45,5	1,3
		190	1040	510	-	-	2,2
		270	1025	505	46	45,5	4,0
		420	985	485	-	-	4,8
	inter- mittierend 15 Min/Tag	6x	1020	500	45	45	2,2
		2x	960	470	41,5	42	2,7
56 1)	kontinu- ierlich Upm	75	1080	530	47	46	1,8
		190	1080	530	-	-	2,4
		270	1080	530	47	46	5,0
		420	1020	500	-	-	5,5
inter- mittierend 15 Min/Tag	6x	1020	500	45	44,5	4,5	
	2x	990	485	42,5	43	4,5	
	1x	990	485	42,5	43	5,4	
56 2)	kontinu- ierlich Upm	75	1040	510	46	45,5	2,5
		190	1040	510	-	-	3,5
		270	1040	510	46	45,5	4,4
		420	1000	490	-	-	5,9
	inter- mittierend 15 Min/Tag	6x	1020	500	45	45	3,5
		2x	970	475	42	42,5	5,0
1x	970	475	41,5	42,5	6,5		

1) Fermenter mit 4,5 l Füllvolumen

2) Fermenter mit 1,5 l Füllvolumen

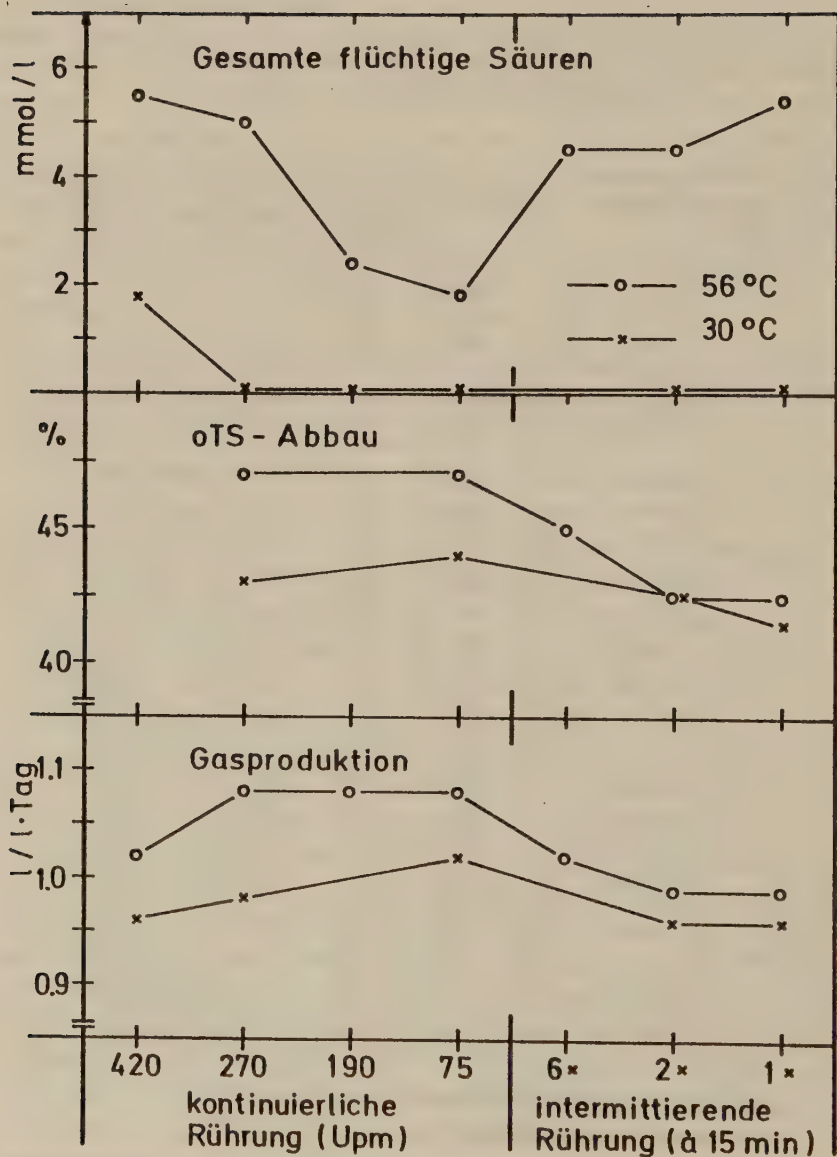


Abb. 21: Einfluß der Rührintensität auf die Gasproduktion, den Abbau der organischen Substanz und die Konzentration flüchtiger organischer Säuren

Substrat: Schlammcharge 1; Schlammverweilzeit: 11 Tage

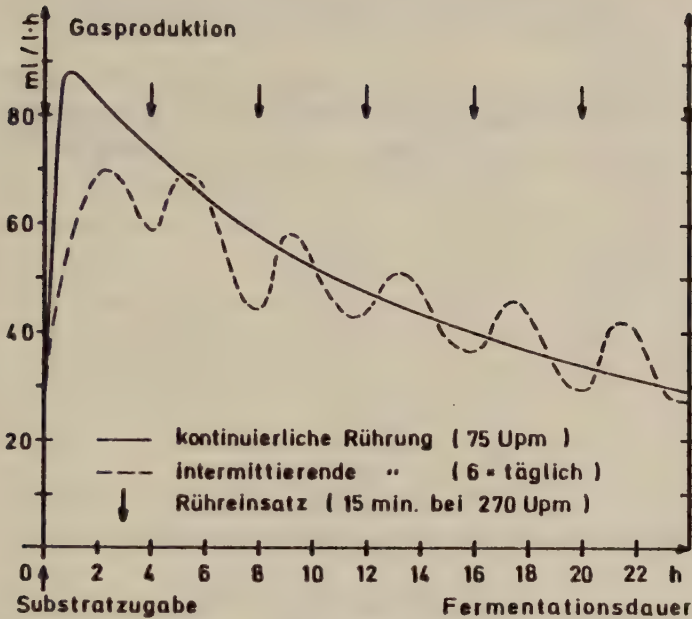


Abb. 20: Kinetik der Gasproduktion bei kontinuierlichem und intermittierendem Rührbetrieb

Fermentationstemperatur: 56°C ; Schlammverweilzeit: 11 Tage; Substrat: Schlammcharge 1

eine Behinderung des Substratüberganges von der säureproduzierenden zur säureverwertenden Bakterienflora zur Folge hätte.

Einzige flüchtige Säure im fermentierten Schlamm war bei 30°C Essigsäure; Propionsäure konnte nur bei täglich einmaliger Rührung nachgewiesen werden. Im thermophilen Bereich nahm bei hohen Rührgeschwindigkeiten sowie bei Intervallrührung die Konzentration von Propionsäure deutlich zu, was auf eine Störung des Propionsäure-verwertenden Systems hindeutet.

Insgesamt zeigen die Versuchsergebnisse, daß bei thermophiler Prozeßführung im Vergleich zu mesophilem Betrieb kein höherer Bedarf an Rührenergie vorliegt und daß die besten

Fermentationsleistungen in beiden Temperaturbereichen bei schwacher, kontinuierlicher Durchmischung des Faulgutes zu erwarten sind.

Als Konsequenz aus diesen Erkenntnissen wurden die Fermentationen im Rahmen unserer Untersuchungen bei gleichmäßigem Rührbetrieb mit einer Drehzahl von 75 U/min. durchgeführt.

D. Auswirkungen von Stoßbelastungen auf die Fermentation

In der Praxis werden Faulanlagen häufig nicht bei einer konstanten Verweilzeit betrieben, vielmehr richtet sich die Menge der täglichen Substratzufuhr nach der Menge des anfallenden Klärschlammes. Auf diese Weise kann es zu Stoßbelastungen mit womöglich schädlichen Auswirkungen auf den weiteren Fermentationsverlauf kommen. In den folgenden Versuchen sollte bei unterschiedlichen Fermentationstemperaturen die Stabilität des Gärprozesses auf Stoßbelastungen untersucht werden.

Ergebnisse

Die Stoßbelastungen wurden bei unseren Untersuchungen durch Verkürzungen der Aufenthaltszeiten in größeren Sprüngen simuliert. Der Verkürzung der Verweilzeiten von 22 auf 11 und von 11 auf 4 Tage entsprach eine Zunahme der organischen Raumbelastung um das doppelte bzw. knapp dreifache. Untersucht wurde die Auswirkung von Stoßbelastungen bei einer mesophilen (35°C) und zwei thermophilen (50°C und 60°C) Temperaturen. Die Ergebnisse sind in Tab. 21 und Abb. 22, 23 zusammengefaßt.

Tab. 21: oTS-Abbau und Konzentrationen flüchtiger Säuren
bei unterschiedlichen Stoßbelastungen

Raum- belastung g oTS/l·Tag	Zeit Tage	Ges.flüchtige Säuren mmol/l			Abbau der oTS %		
		35°C	50°C	60°C	35°C	50°C	60°C
1,45		0,4	0,4	4,5	51,5	53,5	52,5
2,90		0,6	0,6	6,5	49	49	49
8,10	1	9,0	7,6	21,0	•	•	•
	2	24,8	15,5	28,6	•	•	•
	3	38,3	17,9	23,7	•	•	•
	10	41,4	15,7	26,3	•	•	•
	20	26,5	14,9	24,4	•	•	•
	30	26,1	13,1	23,1	35,0	44,0	44,0
8,10*		7,5	16,0	21,9	44,0	44,5	44,5

*nach schrittweiser Reduzierung der Verweilzeiten
unter steady state - Bedingungen

Auf die Verkürzung der Verweilzeit von 22 Tage auf 11 Tage reagierten alle Fermenter mit einer spontanen Erhöhung der Gasproduktion. Bereits 2 Tage nach Umstellung auf die 11-tägige Verweilzeit wurde eine nahezu konstante Gasproduktion registriert, wobei die pro Tag gebildete Gasmenge etwa der Verdoppelung der organischen Raumbelastung entsprach. Die Konzentration der flüchtigen Säuren blieb bei den Temperaturen von 35°C und 50°C sehr gering (< 1 mmol/l), eine deutliche Steigerung von 4,5 mmol/l auf 6,5 mmol/l war nur bei 60°C festzustellen.

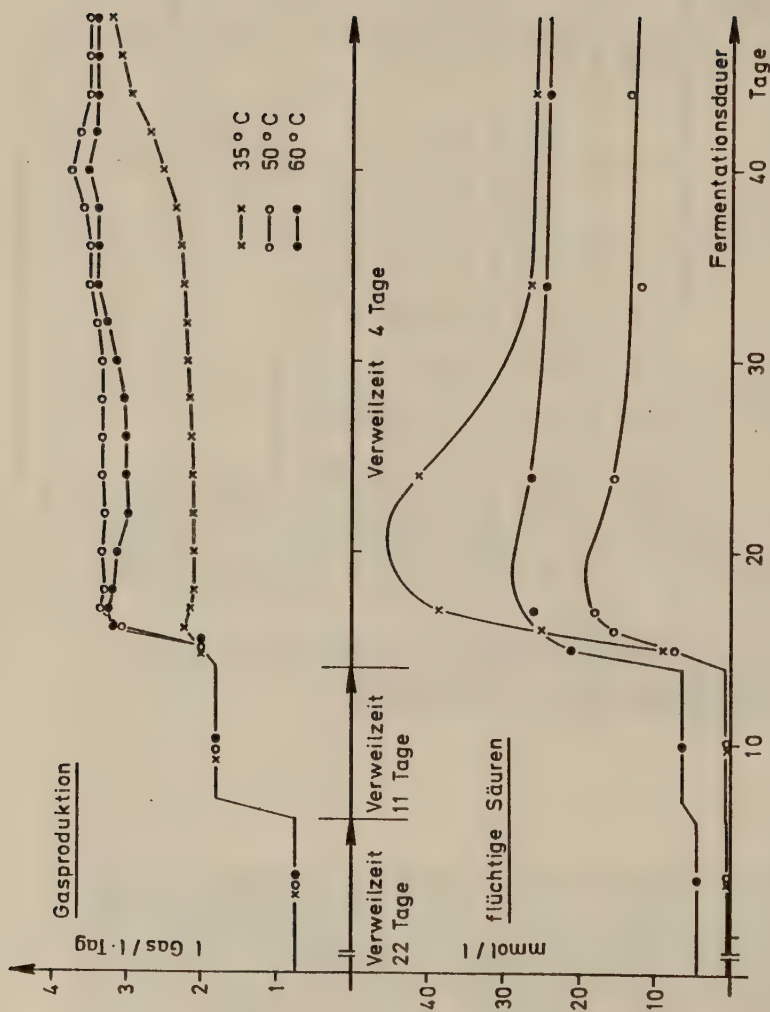


Abb. 22: Verlauf der Gasproduktion und der Gesamt-flüchtigen organischen Säuren bei Verminderung der Verweilzeiten (Erhöhung der Raumbelastung) in größeren Stufen

Substrat: Schlammcharge 3

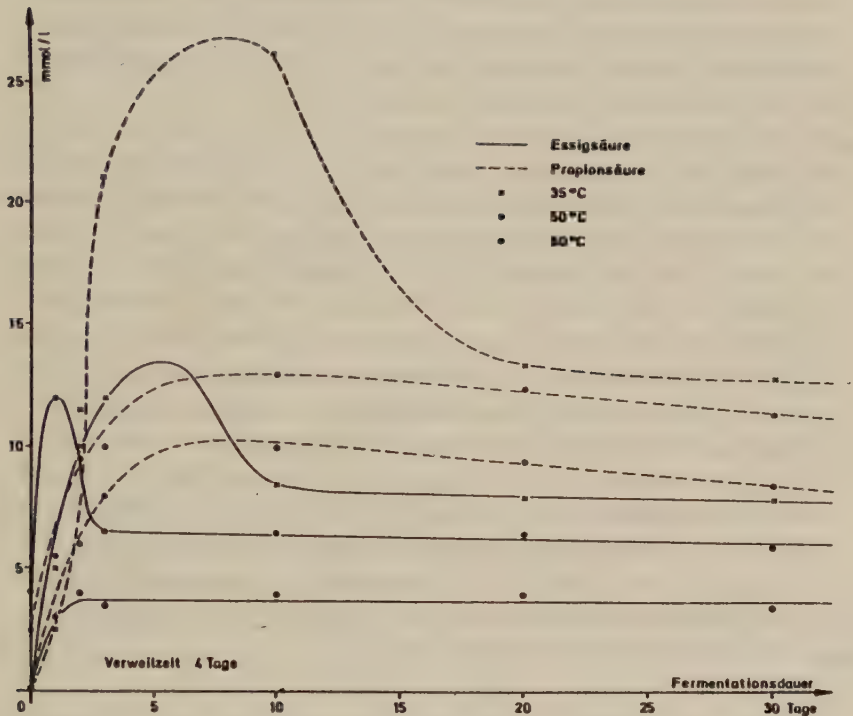


Abb.23: Verlauf der Essig- und Propionsäurekonzentrationen nach Umstellung der Verweilzeit von 11 auf 4 Tage
Substrat: Schlammcharge 3

Eine weitere Verkürzung der Verweilzeiten von 11 auf 4 Tage (Erhöhung der Raumbelastung von 2,9 g auf 8,1 g) hatte nur bei den beiden thermophilen Temperaturen einen sofortigen Anstieg der Gasproduktion zur Folge; 2 bis 3 Tage nach der Umstellung wurden bei 50°C und 60°C bereits etwa 90 % der zu erwartenden, unter steady state-Bedingungen bei gleicher Belastung und Verweilzeit (vgl. Versuch A.1.) gebildeten Gasmenge produziert. Hingegen stieg die Gasproduktion bei 35°C nur ganz allmählich

an, erst nach gut einem Monat war das gleiche Niveau wie bei 50°C - 60°C erreicht. Nach Erhöhung der Raumbelastung war bei allen Temperaturen eine starke Schaumbildung des Fermenterinhalt festzustellen, die bei den thermophilen Temperaturen nach etwa 10 Tagen nachließ, bei 35°C jedoch auch nach 35 Tagen noch zu beobachten war.

Mit der Verkürzung der Haltezeit auf 4 Tage stieg der Gehalt an flüchtigen organischen Säuren in allen Fermentern drastisch an. Besonders betroffen war der bei 35°C betriebene Fermenter, in dem während des Übergangszustandes Konzentrationen bis zu 45 mmol/l gemessen wurden; selbst nach 35 Tagen lag die Gesamtsäurekonzentration noch über 25 mmol/l. Bei den Temperaturen von 50°C und 60°C stellte sich ein neuer steady state-Zustand nach etwa 10 Tagen ein - das dabei erreichte Säure-Level entsprach annähernd der Säurekonzentration, wie sie sich nach langsamer stufenweise erfolgter Verkürzung der Verweilzeiten auf 4 Tage einstellte (vgl. Versuch A.1.). Auffallend war bei allen Temperaturen die im Vergleich zu Essigsäure stärkere Zunahme von Propionsäure nach Verkürzung der Haltezeit sowie der relativ hohe Anteil von Propionsäure (zwischen 50 und 65 %) an den gesamten flüchtigen Säuren auch nach Erreichung des steady state-Zustandes (Abb. 23).

Diskussion

Insgesamt zeigte sich eine sehr hohe Stabilität thermophiler Fermentationsansätze gegenüber Stoßbelastungen.

Wie die niedrigen Gasraten und der hohe Säurespiegel nach Umstellung der Verweilzeit auf 4 Tage andeuten, können bei mesophilen Temperaturen hohe Belastungsstöße offensichtlich wesentlich schwerer abgepuffert werden. Der über mehrere Tage anhaltende instabile Fermentationszustand deutet dabei auf eine Störung des physiologischen Gleichgewichts hin, hervorgerufen durch die im Vergleich zur Säure-verwertenden Flora (hier vor allem die Propionsäure-verwertenden Bakterien) stärkere

Aktivität fermentativer Keime.

Neben dem Aufschluß über das Verhalten gegenüber Stoßbelastungen zeigen diese Versuche auch die Möglichkeit einer Verkürzung höherer Schlammverweilzeiten in größeren Schritten an. Bei Reduzierung der Haltezeiten von 20 bis 30 Tagen -wie sie in der Praxis gängig sind- auf 10 Tage dürften bei Wahrung der Betriebssicherheit 2 Belastungszwischenstufen ausreichend sein; wird eine weitere Verkürzung angestrebt, sollte diese -vor allem bei mesophilen Temperaturen- allerdings in kleineren Schritten erfolgen.

Die Ergebnisse liefern des weiteren eine Erklärungsmöglichkeit für die nach Untersuchungen von Fair u. Moore (1937) zustandegekommene Ansicht einer geringeren Leistungsfähigkeit mesophiler Fermentationsansätze. Der von den Autoren festgestellte verlangsamte Faulgasanfall sollte nach unseren Versuchen vor allem auf die im Vergleich zu thermophilen Temperaturen wesentlich höhere Empfindlichkeit mesophiler Fermentationsansätze gegenüber drastischen Belastungstößen zurückzuführen sein. Die Interpretation dieser Experimente, nämlich die Erfordernis einer im Vergleich zu thermophilen Temperaturen wesentlich längeren Fermentationsdauer bei mesophilen Temperaturen zur Erzielung gleicher Faulgasmengen, beruht somit auf einem falschen Schluß und zeigt zugleich, daß mit Versuchsanordnungen dieser Art (batch-Versuche) eine Aussage über das tatsächliche Leistungsvermögen gut adaptierter Bakterienpopulationen nicht möglich ist.

E. Auswirkung von Substratzufuhr-Unterbrechungen auf die Fermentation

Größere Defekte an den Schlammleitungssystemen oder andere Betriebsstörungen könnten eine Unterbrechung der täglichen Schlammzufuhr erforderlich machen. In folgenden Versuchen sollte überprüft werden, ob nach Aussetzen der Substratzufuhr über einen längeren Zeitraum (mehrere Tage) die Wiederaufnahme des Reaktorbetriebs mit der gleichen Raumbelastung wie vor der Unterbrechung ohne nachteilige Auswirkungen auf die weitere Fermentation erfolgen könnte, und ob diesbezüglich Unterschiede bei mesophilem und thermophilem Fermenterbetrieb vorliegen.

Ergebnisse

Bei halbkontinuierlich betriebenen Klärschlammfermentern (11 Tage Verweilzeit, Schlammcharge 4, Raumbelastung 2,8 g oTS/1·Tag) wurde die tägliche Substratzufuhr für eine Woche unterbrochen.

Die pro Tag erzeugte Gasmenge nahm bis zum 8. Tag nach Aussetzen der Substratzufuhr ab (Tab. 22, Abb. 24), erholte sich aber sofort nach Zufuhr von frischem Klärschlamm. Bereits 4 bis 5 Tage nach Herstellung der ursprünglichen Verhältnisse war wieder ein stabiler Fermentationszustand erreicht. Der pH-Wert blieb während der Fütterungspause praktisch konstant, sank jedoch nach Substratzufuhr um ca. 0,2 Einheiten ab. Ähnlich wie bei der Gasproduktion wurde der Ausgangswert nach etwa 4 Tagen wieder erreicht.

Das leichte Absinken des pH-Wertes nach Zugabe von frischem Substrat -hervorgerufen durch Säureproduktion der relativ unempfindlichen fermentativen Keime- deutet auf einen leicht instabilen Fermentationszustand hin. Offensichtlich sind jedoch auch nach einwöchiger Fütterungspause Vertreter aller am Gesamtmineralisierungsprozeß beteiligten Bakteriengruppen noch in ausreichender Anzahl im Faulschlamm enthalten, um ein "Umkippen"

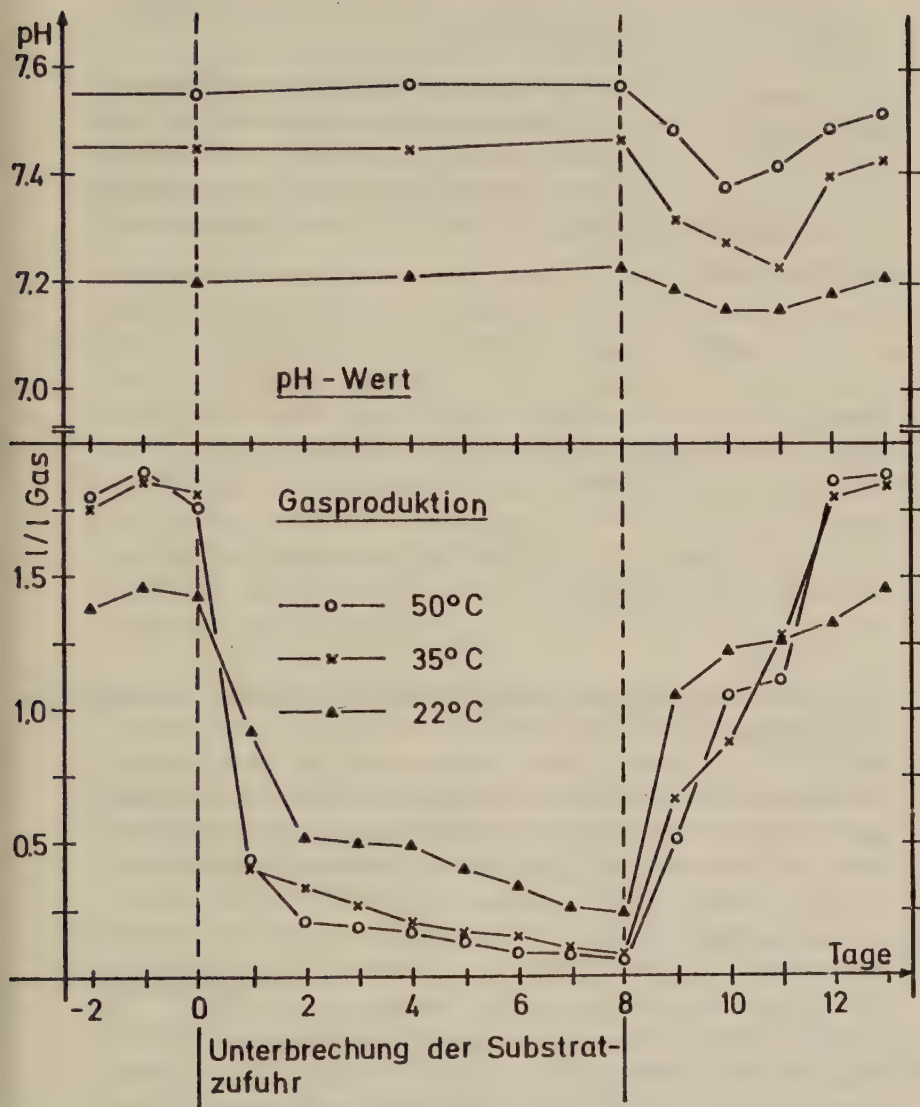


Abb. 24: Gasproduktion und Verlauf des pH-Wertes während der Unterbrechung der Substratzufuhr
 Substrat: Schlammcharge 3

zu verhindern und eine Erholung des Fermentationsprozesses innerhalb kurzer Zeit zu bewirken.

Die Ergebnisse zeigen, daß eine gut adaptierte Bakterienflora -unabhängig von der Fermentationstemperatur- in der Lage ist, kurzzeitige Fütterungspausen (zumindest bis zu 8 Tagen) zu überdauern und es nicht erforderlich ist, bei Wiederinbetriebnahme des Gärreaktors die ursprüngliche Raumbelastung zu reduzieren.

F. Stabilität des Fermentationsprozesses gegenüber Temperaturschwankungen

Bei Klärschlammfermentationen handelt es sich um komplexe physiologische Vorgänge, an denen mehrere Bakteriengruppen unterschiedlicher Funktion beteiligt sind (Wolfe, 1979; Soutschek-Bauer, 1982; Kandler, 1983). Mit Hilfe dieser Mikroorganismen wird durch schrittweisen Abbau der im Schlamm enthaltenen polymeren Substanzen (Kohlenhydrate, Proteine, Fette) eine Mineralisierung des Faulgutes erreicht. Während der Anlaufphase eines Klärschlammfermenters stellt sich ein bestimmtes Gleichgewicht der an dem Abbauprozess beteiligten Bakteriengruppen ein, wobei sich innerhalb der verschiedenen Gruppen die den Fermentationsbedingungen am besten angepassten Arten durchsetzen. Bezogen auf die Geschwindigkeit der Gesamtreaktion, entspricht deshalb das sich während der Adaptationszeit einstellende Gleichgewicht dem Optimum bei den jeweils gewählten Reaktionsbedingungen, wes-

halb die Erhaltung des Gleichgewichtszustandes Voraussetzung für einen optimalen Fermentationsablauf ist. Die Änderung eines Prozeßparameters, z.B. der Reaktionstemperatur, könnte zu einer Störung des Gleichgewichtszustandes führen, was besonders dann schädliche Auswirkungen auf den Fermentationsprozeß hätte, wenn es zu einer Akkumulation von flüchtigen organischen Säuren und einem Absinken des pH-Wertes käme.

Aufgrund dieser Überlegungen ist die Meinung weit verbreitet, daß bereits kurzzeitige Schwankungen der Prozeßtemperatur von nur wenigen Graden zu erheblichen Prozeßstörungen führen würden (vgl. Buhr u. Andrews, 1977). Dabei wird heute allgemein die Ansicht vertreten, daß die Empfindlichkeit des Fermentationsprozesses gegenüber Temperaturschwankungen bei höheren Fermentationstemperaturen noch zunimmt. Obwohl für den Praxisbetrieb von großer Bedeutung, wurden zu diesem Thema verhältnismäßig wenige Untersuchungen durchgeführt, die zudem sich teilweise widersprechende Ergebnisse (Heukelekian u. Kaplovsky, 1948; Golueke, 1958) brachten.

Die folgenden Versuche sollten zu einer Klärung dieses Sachverhaltes beitragen. Hierzu wurden bei verschiedenen Belastungsstufen die Auswirkungen kurzfristiger (2 bis 10 Stunden) und langfristiger (4 bis 5 Tage) Temperaturschwankungen auf den Fermentationsverlauf untersucht; Kriterien waren die Gasproduktion und der pH-Wert.

Ergebnisse

Die Umstellung der Fermentationstemperaturen bei den Langzeit-Temperaturänderungen ($+3^{\circ}\text{C}$ bzw. -3°C für 4 Tage) sowie bei der kurzzeitigen Temperaturabsenkung um 10°C für 2 Stunden wurde stets unmittelbar nach der Schlammzugabe durchgeführt; die kurzzeitigen Temperaturabsenkungen (ca. 4 bis 10 Stunden) erfolgten wenigstens 8 Stunden nach Beschickung der Fermenter mit frischem Klärschlamm.

Die Ergebnisse sind in Abb. 26 zusammengefaßt.

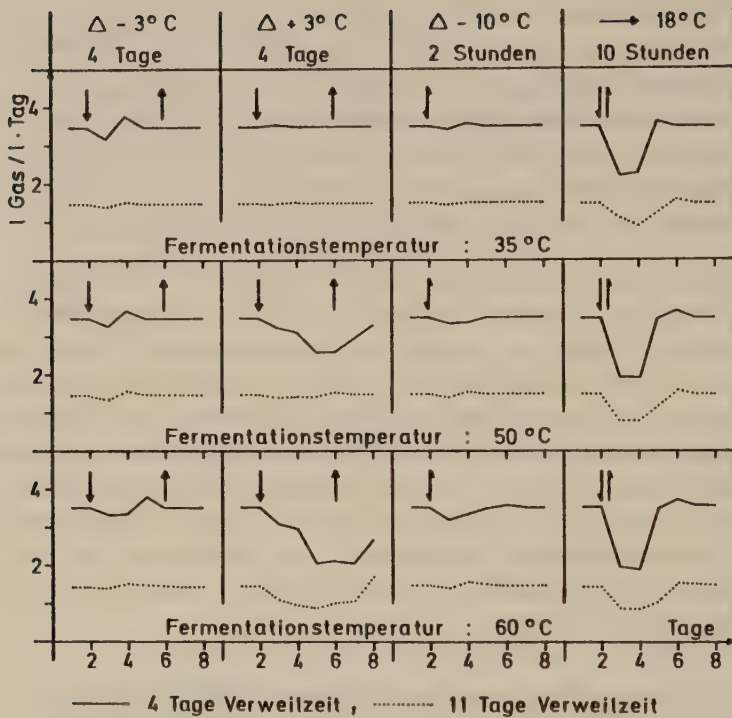


Abb. 26: Auswirkungen von kurz- und langfristigen Änderungen der Solltemperatur auf die produzierte Gasmenge
Substrat: Schlammcharge 3

Eine kurzzeitige Temperaturerniedrigung um 10°C für 2 Stunden hatte keine Folgen für die niederbelasteten Fermenter und führte nur bei den hochbelasteten Fermentern zu einer etwas geringeren Gasproduktion während des ersten Tages. Sowohl der pH-Wert als auch die produzierte Gasmenge blieben während des weiteren Fermentationsverlaufs weitgehend konstant.

Eine Absenkung der Fermentationstemperatur um 3°C über 4 bzw. 5 Tage zeigte bei allen getesteten Temperaturen und Belastungsstufen praktisch keinen Einfluß auf die Stabilität des Fermentationsprozesses. Nur innerhalb der ersten 24 Stunden nach der Temperaturabsenkung ergab sich ein geringer Abfall der Gasproduktion mit sofortiger Erholung am folgenden Tag, der pH-Wert blieb während der 4 bzw. 5 Tage konstant.

Eine Erhöhung der Reaktionstemperatur um 3°C für vier Tage hatte unterschiedliche Auswirkungen auf die verschiedenen Fermentationsansätze. Im mesophilen Bereich blieben die Fermenter beider Belastungsstufen, sowohl was die erzeugte Gasmenge als auch den pH-Wert angeht, weitgehend unverändert. Ähnliches trifft auch auf den niederbelasteten 50°C -Fermenter zu. Negative Folgen hatte die Temperaturerhöhung für den hochbelasteten 50°C -Fermenter sowie beide 60°C -Fermenter. In allen drei Fällen kam es zu einem deutlichen Absinken der Gasproduktion bis auf ca. 40-50 % des Ausgangswertes am vierten Tag nach der Temperaturumstellung. Der pH-Wert ging während dieser Zeit bei dem 50°C -Fermenter von 7,30 auf 7,15 zurück, beim niederbelasteten 60°C -Fermenter von 7,50 auf 7,20 und reduzierte sich beim hochbelasteten 60°C -Fermenter von 7,45 auf 7,15. Zu einer Erholung des Fermentationsprozesses kam es erst nach Wiederherstellung der Ausgangstemperatur. Nach 5 Tagen (niederbelasteter 60°C -Fermenter), 7 Tagen (hochbelasteter 50°C -Fermenter) wurden die früheren Gasraten wieder erreicht, der ursprüngliche pH-Wert stellte sich erst wieder einige Tage später ein.

Ein Absenken der Fermentationstemperatur auf Raumtemperatur (ca. $15 - 20^{\circ}\text{C}$) hatte in jedem Fall, je nach Dauer dieses Zustandes, ein mehr oder weniger starkes Nachlassen der Gasproduktion zur Folge. Bei allen getesteten Fermentationstemperaturen und Belastungszuständen kam es jedoch nach Einstellung der ursprünglichen Temperatur zu einer raschen Erholung, bleibende Effekte wurden nicht beobachtet. Als Vorsichtsmaßnahme wurde in einem Fall nach 10-stündigem Stromausfall (Temperatur aller Fermenter: ca. 18°C) auf eine Beschickung mit frischem

organischem Material verzichtet und erst am folgenden Tag eine Schlammzugabe vorgenommen. Die ursprüngliche Gasproduktion wurde in diesem Fall nach 2 bis 3 Tagen erreicht.

Diskussion

Die Versuchsergebnisse zeigen eine sehr hohe Stabilität des Fermentationsprozesses gegenüber Temperaturschwankungen. Selbst extreme Bedingungen wie z.B. die mehrstündige Absenkung der Reaktionstemperatur auf ca. 20°C blieben auch bei den thermophilen Gäransätzen ohne negative Auswirkungen auf die weitere Fermentation.

Am nachhaltigsten wirkte sich noch eine langfristige Temperaturerhöhung um 3°C für vier Tage auf die thermophilen Fermentationsansätze der hochbelasteten Fermenter (4 Tage Verweilzeit) aus. Die stark verlangsamte Gasproduktion wäre dadurch zu erklären, daß der Teil der Bakterienpopulation, der bereits bei der Ausgangstemperatur nahe seiner Temperatur-Obergrenze war, nach Erhöhung der Temperatur in seiner Stoffwechseltätigkeit stark beeinträchtigt war.

Da entsprechende Auswirkungen von Temperaturerhöhungen (Nachlassen der Gasproduktion, Abnahme des pH-Wertes) auch an anderer Stelle beobachtet wurden (Garber, 1975), sollte bei Fermentationen im thermophilen Bereich eine Erhöhung der Soll-Temperatur über einen längeren Zeitraum unbedingt vermieden werden.

Realistischer als Überhöhungen der Prozeßtemperatur dürften im Praxisbetrieb jedoch Temperatureinbrüche als Folge von Störungen des Heizsystems sein, wozu allerdings bemerkt werden sollte, daß bei Fermentationen im großtechnischen Maßstab auch bei völligem Ausfall der Heizsysteme wegen der hohen Wärmekapazität der Faultürme und der geringen Transmissionsverluste nur minimale Absenkungen der Reaktionstemperatur zu erwarten sind. Beispielsweise würde bei einem kugelförmigen, gut isolierten Faulturm mit einem Faulraumvolumen von 2500 m³ und thermophiler Betriebsweise (60°C) ein Ausfall der Heizung für 24 Stunden lediglich eine Abnahme der Fermentationstem-

peratur um $1,4^{\circ}\text{C}$ bedingen (vgl. Kandler 1976).

Bei einem Faulraumvolumen von 6.500 m^3 , wie es etwa die Faultürme der Kläranlagen in München-Großlappen aufweisen, hätte eine entsprechende Störung sogar nur eine Abweichung von ca. $0,2^{\circ}\text{C}$ von der Solltemperatur zur Folge. Selbst im ungünstigsten Fall, der dann gegeben wäre, wenn die Heizaggragate unmittelbar nach Beschickung des Faulturmes mit frischem Klärschlamm (Substrattemperatur: 12°C) ausfielen, würde bei einer durchschnittlichen Schlammverweilzeit von 10 Tagen die Prozeßtemperatur nur um ca. $3,8^{\circ}\text{C}$ (Fermentationstemperatur: 50°C) bzw. $4,8^{\circ}\text{C}$ (Fermentationstemperatur: 60°C) abnehmen. Mit Hilfe von Wärmetauschern, wie sie bei thermophilem Betriebsmodus aus wirtschaftlichen Gründen ohnehin verwendet werden sollten, ergäben sich noch geringere Abweichungen von der Normaltemperatur und würden bei einem Wirkungsgrad von ca. 50 bis 60 % nur mehr eine Temperaturdifferenz von ca. 2,5 bzw. 3°C ausmachen.

Nachdem selbst die bei unseren Untersuchungen simulierten äußerst ungünstigen Betriebsbedingungen, wie sie in diesem Ausmaß bei großtechnischen Anlagen ausgeschlossen sind, in keinem Fall bleibende Auswirkungen auf den weiteren Fermentationsablauf zeigten, sollten Klärschlamm-Fermentationen, soweit es die Prozeßsicherheit betrifft, im thermophilen Bereich ohne besonderes Risiko möglich sein.

G. Physiologische Aktivität von Faulschlämmen unterschiedlich stark belasteter Klärschlamm-Fermenter

Folgende Versuche wurden durchgeführt, um Hinweise darauf zu erhalten, ob Faulschlämme aus hoch belasteten Fermentern eine größere physiologische Aktivität (Bakterienmasse) aufweisen; überprüft wurden sowohl mesophil (35°C) als auch thermophil (50°C , 60°C) fermentierte Schlämme.

Die Untersuchungen wurden mit Hilfe der Warburg-Apparatur durchgeführt, deren prinzipielle Verwendbarkeit für den angestrebten Zweck bei Vorversuchen sichergestellt wurde.

Untersucht wurden -jeweils bei einer der angegebenen Fermentationstemperaturen- 2 Faulschlämme aus Klärschlammfermentern, von denen der eine bei einer mittleren Haltezeit von 3 Tagen (Raumbelastung $10,7 \text{ g oTS/l}\cdot\text{Tag}$), der andere bei einer Verweilzeit von 22 Tagen (Raumbelastung $1,5 \text{ g oTS/l}\cdot\text{Tag}$) betrieben wurde. In den Warburg-Reaktionsgefäßen wurden die aus den Fermentern stammenden Faulschlämme mit unterschiedlich konzentriertem frischem Klärschlamm so beschickt, daß sich, bei gleichem Endvolumen, 4 verschiedene Raumbelastungen ergaben. Zur Auswertung kam die Gasmenge, die 20 Minuten nach Zugabe von frischem Klärschlamm innerhalb der darauf folgenden Stunde produziert wurde.

Falls die Faulschlämme aus hochbelasteten Fermentern eine im Vergleich zu schwach belasteten Fermentern mehr aktive Biomasse enthalten, würde sich dies in einer höheren Gasproduktion ausdrücken. Dieser Vermutung liegt die Annahme einer qualitativ identischen Enzymausstattung bzw. Bakterienzusammensetzung im Faulschlamm der verschieden stark belasteten Fermenter zugrunde. Übertragen auf das enzymkinetische Modell von Michaelis-Menten, sollten sich deshalb bei gleicher Bakterienzusammensetzung, jedoch unterschiedlicher Bakterienanzahl (Enzymmenge) gleiche Michaelis-Konstanten K_m , aber voneinander abweichende Reaktionsgeschwindigkeiten $v_{\max}$ ergeben.

Da es aus technischen Gründen nicht möglich war, die Versuche mit den 3 zu testenden Fermentationstemperaturen gleichzeitig durchzuführen, wurden nur die beiden Faulschlämme einer Tempe-

Tab. 22: Gasproduktionsraten unterschiedlich stark belasteter
Faulschlämme

Raumbe- lastung g oTS/l	Gasproduktion ml Gas/l x Std.					
	35°C		50°C		60°C	
	1	2	1	2	1	2
1,27	20	26	18	61	24	43
2,54	38	62	34	121	36	103
5,08	55	122	56	162	60	143
7,63	64	126	64	175	59	175

1 = Schlamm aus schwach belastetem Fermenter (Verweilzeit
22 Tage)

2 = Schlamm aus stark belastetem Fermenter (Verweilzeit 3 Tage)

Substrat: Schlammcharge 3

ratur gemeinsam untersucht. Bedingt durch möglicherweise ge-
ringe Abweichungen im oTS-Gehalt des eingesetzten Klärschlammes,
könnte es an den verschiedenen Versuchstagen zu etwas unter-
schiedlichen Gasproduktionsraten kommen. Um falsche Schlüsse
zu vermeiden, wurden deshalb nicht die ermittelten Gasproduk-
tionswerte der 3 Fermentationstemperaturen untereinander, son-
dern nur die Werte aus den Parallelansätzen einer Fermenta-
tionstemperatur miteinander verglichen.

Ergebnisse und Diskussion

Unabhängig von der verwendeten Fermentationstemperatur, wies
der Faulschlamm aus den hoch belasteten Fermentern bei allen
geprüften Raumbelastungen signifikant höhere Gasproduktions-
raten auf (Tab. 22).

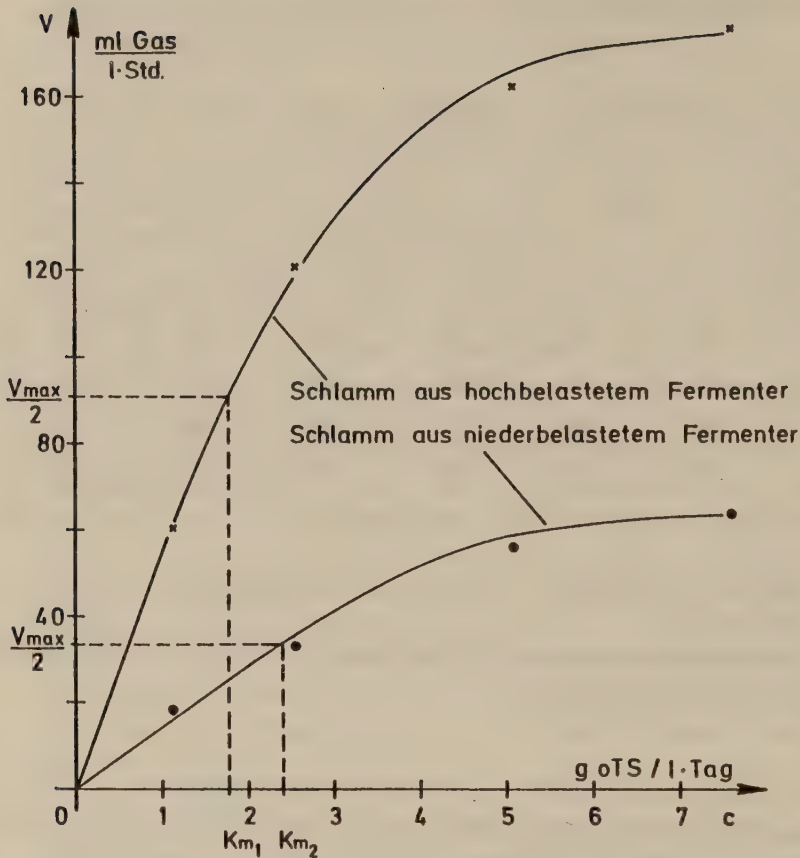


Abb. 25: Gasproduktionsraten unterschiedlich belasteter
Faulschlämme

Fermentationstemperatur: 50°C

Substrat: Schlammcharge 3

Trägt man in ein Diagramm entsprechend der Beziehung zwischen Substratkonzentration und Reaktionsgeschwindigkeit (Michaelis-Menten) auf die Abszisse die Raumbelastung (g oTS/l-Tag) und auf die Ordinate die pro Zeiteinheit freigesetzte Gasmenge ein, ergibt sich die in Abb. 25 dargestellte, für Enzymreak-

tionen typische Sättigungskurve (da die Kurven bei allen gewählten Temperaturen eine prinzipiell gleiche Charakteristik aufweisen, wurden aus Gründen der Übersichtlichkeit nur die für 50°C erhaltenen Meßwerte in das Diagramm eingetragen).

Wie aus Abb. 25 zu entnehmen ist, unterscheiden sich -bezogen auf jeweils eine Fermentationstemperatur- die Werte für $v_{\max}$ erheblich, wohingegen die Michaelis-Konstanten relativ eng zusammenliegen. Dieses Phänomen zeigt sich bei allen getesteten Temperaturen gleichermaßen.

Diese Ergebnisse entsprechen den Erwartungen, daß Faulschlamm aus hochbelasteten Klärschlamm-Fermentern (kurze Verweilzeiten) -unabhängig von der Fermentationstemperatur- im Vergleich zu nieder belasteten Fermentern (lange Verweilzeiten) einen höheren Gehalt an aktiver Biomasse aufweist. Dadurch wäre eine deutliche Steigerung der Effizienz des Fermentationsprozesses gegeben, eine Tatsache, die in der Praxis vor allem dann Berücksichtigung finden sollte, wenn das primäre Anliegen nicht in einem möglichst hohen Ausfaulungsgrad (z.B. bei kommunalen Kläranlagen), sondern in hohen Gasproduktionsraten (1 Gas/l·Tag, z.B. bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen) besteht.

Die Ergebnisse bestätigen auch die Empfehlung, die Steigerung der Raumbelastung nicht in sehr großen Sprüngen vorzunehmen. Wegen des relativ geringen Gehaltes an aktiver Biomasse in schwach belasteten Fermentern könnte es sonst anstelle einer gemeinsamen Anpassung der Bakterienflora an die höhere organische Belastung möglicherweise zu einem Überwiegen der fermentativen säurebildenden Keime kommen, was eine Übersäuerung des Fermenterinhalt zur Folge hätte. Ausdruck dieses instabilen Fermentationszustandes wäre ein Nachlassen, schlimmstenfalls ein vollkommenes Erliegen der Gasproduktion bei gleichzeitigem Absinken des pH-Wertes (vgl. dazu Versuch D).

H. Geruch, Lagerfähigkeit und Entwässerungseigenschaften des fermentierten Klärschlammes

In modernen Kläranlagen wird der stabilisierte Faulschlamm, sofern keine Naßabfuhr möglich ist, aus den Faultürmen zunächst in Schlammstapelbehälter oder Nacheindicker gepumpt, wo eine erste Entmischung des Faulgutes stattfindet. Danach wird der bereits etwas eingedickte Schlamm entweder natürlich oder künstlich weiter entwässert, wobei heute besonders in größeren Klärwerken die Variante der künstlichen Entwässerung bevorzugt wird. Man bedient sich dabei vor allem der Zentrifugation und verschiedener Filtermethoden. Der auf diese Weise eingedickte Schlamm wird auf Deponien (mit Kalkzusatz) abgelagert oder kommt als landwirtschaftlicher Dünger zum Einsatz, das anfallende Faul- (Zentrifugen-) Wasser gelangt in die Vorklärung (Abb. 27).

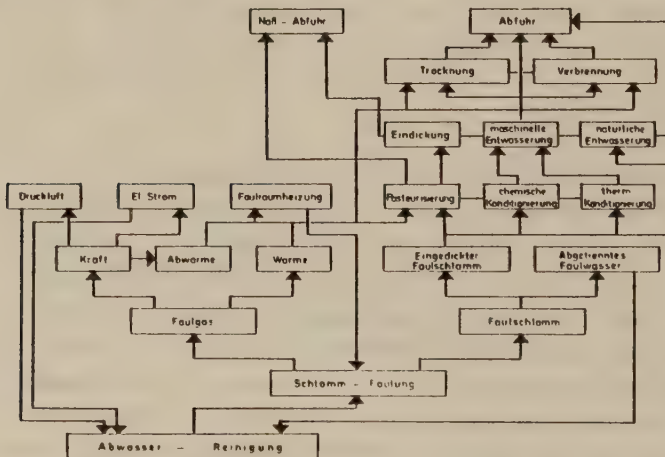


Abb. 27: Schematische Darstellung der Faulschlamm-Aufbereitung und -Entsorgung (Roediger, 1973).

1. Geruch und Lagerung des fermentierten Schlammes

Das wichtigste Ziel der anaeroben Schlammfäulung ist die Stabilisierung des Faulgutes. Durch diese Art der Behandlung wird der Klärschlamm in eine Form übergeführt, in der er gut lagerfähig ist und keine Geruchsbelästigungen mehr zur Folge hat.

Da anzunehmen war, daß sich mesophil und thermophil vergorene Schlämme hinsichtlich ihres Stabilisierungsgrades voneinander unterscheiden, wurden diesbezügliche Untersuchungen mit in unser Programm aufgenommen. Dabei wurden sowohl Geruchsvergleiche der bei den unterschiedlichen Temperaturen und Verweilzeiten fermentierten Schlämme angestellt als auch das Verhalten dieser Schlämme bei offener Lagerung im Hinblick auf mögliche Geruchsbelästigungen überprüft.

Ergebnisse

Der bei den verschiedenen Temperaturen und Verweilzeiten fermentierte Schlamm wurde jeweils nach Entnahme aus den Fermentern einer Geruchsprobe unterzogen; zudem wurden ca. 0,5 l des Schlammes in offene 1,5 l-Gefäße (Polyäthylflaschen) abgefüllt und diese in einen geschlossenen Raum mit einer konstanten Temperatur von 15°C gestellt. Nach einer Lagerungszeit von einem, fünf und zehn Tagen wurde der Schlamm auf Schwimmdecken- und Blasenbildung hin untersucht sowie der Geruchseindruck protokolliert.

Um die verschiedenen Geruchseindrücke in Relation zueinander zu bringen, wurde eine Bewertungsskala der Zahlen 1 bis 5 erstellt. Die Zahl 1 als beste Bewertung bedeutet dabei den leicht teerigen, erdigen, nicht unangenehmen Geruch des voll ausgefauten Schlammes. Bezug für diese Beurteilung war der Geruch eines bei 35°C über drei Monate lang ausgefauten Schlammes.

Die Zahl 3 bedeutet einen deutlich wahrnehmbaren, leicht unangenehmen Geruch.

Die Zahl 5 als schlechteste Bewertung in dieser Skala drückt

äußerst unangenehmes Geruchsempfinden aus.

Die Zahlen 2 und 4 sind als Zwischenbeurteilungen eingefügt.

Zur Untersuchung kamen die Faulschlämme aller im Rahmen dieses Projektes verwendeten Klärschlammchargen (Schlammchargen 1 - 4). Bei den Schlammchargen 1 und 2 wurde nur der Geruch des fermentierten Schlammes registriert, bei den Schlammchargen 3 und 4 kam dazu noch das Verhalten des fermentierten Schlammes während seiner Lagerungszeit.

Die Ergebnisse sind in Tab. 23 zusammengefaßt.

Das Geruchsbild der mesophil vergorenen Schlämme (22°C - 40°C) war relativ einheitlich und wurde als nicht unangenehm empfunden; nur bei sehr hoher Belastung der Fermenter (Verweilzeit von 4 Tagen) war ein etwas unangenehmer Geruch wahrzunehmen.

Ab etwa $35^{\circ}\text{C}/40^{\circ}\text{C}$ nahm der unangenehme Geruch der Fermenterausläufe etwa proportional der Fermentationstemperatur zu. Unabhängig von der organischen Belastung, löste der bei 60°C fermentierte Schlamm das unangenehmste Geruchsempfinden aus.

Nach eintägiger offener Lagerung wiesen die thermophil vergorenen Schlämme eine den mesophilen Fermentationsansätzen ähnliche Geruchscharakteristik auf. Dieses Geruchsbild blieb über Wochen weitgehend erhalten bzw. wurde während der Lagerung eher noch etwas angenehmer.

Nach einigen Tagen offener Lagerung traten vor allem bei Faulschlämmen aus den hoch belasteten mesophilen Fermentern (4 Tage Verweilzeit) Schwimmschichten auf; besonders stark entwickelt waren diese bei den Faulschlämmen aus dem 22°C -Fermenter.

Die durch Gasentwicklung hervorgerufene Blasenbildung war im gelagerten Faulschlamm aus den mesophilen Fermentern zwar nicht sehr stark (Ausnahme: 22°C), aber doch deutlich ausgeprägter als in den Faulschlämmen aus den thermophil betriebenen Fermentern.

Geruchsemissionen durch Gärungsvorgänge im nicht vollständig stabilisierten Schlamm wurden nicht wahrgenommen. Möglicherweise ist für den Nachweis dieses Stabilisierungskriteriums eine größere Oberfläche des gelagerten Faulgutes notwendig.

Tab.23: Geruch und Lagerungseigenschaften des fermentierten Schlammes

Ferm.temp.	Verw.zeit Tage	Ferm.ausl. Geruch	Lagerung: 1 Tag	Lagerung: 5 Tage	Lagerung: 10 Tage
			Geruch Schwimm.Blasenb.	Geruch Schwimm.Blasenb.	Geruch Schwimm.Blasenb.
22° C	11	2	1 - 2 ++ -	1 - 2 +++ +	1 - 2 +++ +
	7	2	2 +++ +	1 - 2 +++ +	1 - 2 +++ +
	4	2 - 3	2 +++ +	1 - 2 +++ +	1 - 2 +++ +
28° C	11	2	1 - 2 - -	1 - 2 ++ +	1 - 2 ++ +
	7	2 - 3	2 - -	1 - 2 ++ +	1 - 2 ++ +
	4	3	2 ++ -	1 - 2 +++ +	1 - 2 +++ +
35° C	11	2	2 - -	1 - 2 + -	1 - 2 + -
	7	2 - 3	2 - -	1 - 2 ++ +	1 - 2 ++ +
	4	3	2 ++ -	1 - 2 +++ +	1 - 2 +++ +
40° C	11	2	2 - -	1 - 2 + -	1 - 2 + -
	7	2 - 3	2 - -	1 - 2 ++ +	1 - 2 ++ +
	4	3 - 4	2 - 3 ++ -	1 - 2 +++ +	1 - 2 +++ +
45° C	11	3	2 - -	2 - -	1 - 2 + -
	7	3 - 4	2 - -	2 + -	1 - 2 + -
	4	4 - 5	3 - -	2 + -	1 - 2 + +
50° C	11	3 - 4	2 - -	2 - -	1 - 2 - -
	7	4	2 - -	2 + -	1 - 2 + -
	4	4 - 5	3 - -	2 + -	1 - 2 + -
60° C	11	4 - 5	3 - -	2 - -	1 - 2 - -
	7	4 - 5	3 - -	2 - -	1 - 2 - -
	4	5	3 - -	2 + -	1 - 2 + -

Ferm. temp. : Fermentationstemperatur; Verw.zeit : Schlammverweilzeit; Ferm.ausl. : Fermentationsauslauf
 Schwimm. : Schwimmdecke

+ : leichte, nicht zusammenhängende Schwimmdecke
 ++ : leichte, geschlossene Schwimmdecke
 +++ : mittelstarke, geschlossene Schwimmdecke
 ++++ : dicke, geschlossene Schwimmdecke

Blasenb. : Blasenbildung

+ : leichte Blasenbildung
 ++ : starke Blasenbildung

Diskussion

Wie bereits in früheren Untersuchungen durch verschiedene Autoren (Fischer u. Greene, 1945; Garber 1954, 1975) angedeutet, ist die Geruchsqualität der thermophil vergorenen Schlämme, unabhängig vom verwendeten Klärschlamm und der organischen Belastung der Fermenter, deutlich schlechter als die der bei mesophilen Temperaturen fermentierten Schlämme.

Bei der Geruchsbildung scheinen den flüchtigen organischen Säuren keine entscheidende Rolle zuzukommen, da der thermophil fermentierte Schlamm auch bei sehr niedrigem Säurespiegel wesentlich unangenehmer riecht und zudem die Geruchscharakteristik der Schlämme nicht jener der darin nachgewiesenen flüchtigen Säuren (C 2 - C 6) entspricht. Das Geruchsbild sollte demnach durch andere flüchtige Komponenten bestimmt sein, die entweder im thermophilen Bereich in höherer Konzentration vorliegen oder bei entsprechender Konzentration durch den höheren Dampfdruck bei den thermophilen Temperaturen sinnfälliger sind.

Für die Praxis hätte die schlechte Geruchsqualität zur Konsequenz, daß der thermophil behandelte Schlamm nach Verlassen des Faulbehälters unbedingt in geschlossenen Systemen aufbereitet werden müßte, was zunächst den Einsatz von abgedeckten Schlammstapelbehältern als Schlammvoreindicker nötig machte. Das bei der Voreindickung freiwerdende Faulwasser sollte, ebenso wie das bei der folgenden Zentrifugation anfallende Zentrifugenwasser, zur weitgehenden Vermeidung von Geruchsemissionen in geschlossenen Rohren (unterirdisch) zu den Vorklärbecken bzw. Belebungsanlagen geführt und dort nicht an der Oberfläche, sondern nahe dem Beckengrund ausgelassen werden, so wie es heute bereits vielfach praktiziert wird.

Eine offene Lagerung des eingedickten Schlammes erscheint bedenkenlos möglich zu sein.

2. Entwässerbarkeit des fermentierten Klärschlammes

Durch den Abbauprozess der anaeroben Schlammfäulung werden die wasserbindenden und stark wasserhaltigen kolloiden Stoffe weitgehend zersetzt. Dadurch wird das Wasserbindevermögen des schleimigen Frischschlammes gebrochen und der ausgefäulte Schlamm kann infolgedessen wesentlich leichter entwässert werden.

Angestrebtes Ziel der Faulschlamm-Entwässerung ist die Konzentrierung der sich im Faulschlamm befindenden Feststoffe mit einer damit verbundenen Volumen-Minderung des auf Deponie abzulagernden Faulgutes. In der Regel wird dabei eine Konzentrierung der Feststoffe um etwa den Faktor 10 erreicht (von ca. 2 - 4 % TS auf ca. 25 - 40 % TS). Bestehen keine Verwendungsmöglichkeiten für den Faulschlamm, z.B. als landwirtschaftlichen Dünger, so ist wegen der hohen Kosten für die Faulschlamm-Aufbereitung und -Entsorgung gute Entwässerbarkeit des Schlammes ein wichtiger ökonomischer Faktor.

Die bei der Faulschlamm-Aufbereitung entstehenden Kosten betreffen vor allem die künstlichen Entwässerungsverfahren. Diese haben den Nachteil gemeinsam, daß sie eine laufende Überwachung benötigen und infolge des großen Energie- und Chemikalien-Verbrauchs (Flockungsmittel) sehr hohe Betriebskosten verursachen.

Die Kosten für die Schlamm-Entsorgung spielen vor allem dort eine Rolle, wo keine Deponiemöglichkeit in unmittelbarer Nähe des Klärwerks vorhanden ist und der eingedickte Schlamm über weite Strecken zur endgültigen Lagerung transportiert werden muß.

Ein Beispiel dafür ist die Situation in Los Angeles (Garber, 1954 u. 1975), wo der Schlamm über 100 km weit transportiert werden muß und deshalb gute Entwässerbarkeit, verbunden mit möglichst geringem Endvolumen des eingedickten Schlammes, einen entscheidenden wirtschaftlichen Faktor darstellt.

Aufgrund dieser ökonomischen Gegebenheiten war es naheliegend, im Rahmen unseres Versuchsprogramms auch Untersuchungen zur Entwässerbarkeit der bei den verschiedenen Temperaturen stabilisierten Schlämme durchzuführen.

Ergebnisse

Die bei unseren Versuchen im Labormaßstab anfallenden geringen Schlammengen erlaubten es nicht, die Entwässerbarkeit mit Hilfe der in der Praxis verwendeten Einrichtungen wie Eindickern, Zentrifugen oder Filtern zu testen. Aus diesem Grund wurde nur das Sedimentationsverhalten der Faulschlämme untersucht, das jedoch -zumindest tendenziell- auf die Verhältnisse in der Praxis übertragbar sein sollte.

Dies trifft vor allem auf die Nacheindicker und Stapelbehälter zu, in etwas abgeschwächter Form auch auf die Bandpressen (eingesetzt vor allem in Kläranlagen bis ca. 100.000 EGW) und Zentrifugen, während eine Übertragung des Sedimentationsverhaltens auf (Kammer-) Filterpressen (eingesetzt vor allem in Kläranlagen über 100.000 EGW) kaum möglich ist. Eine absolute Übertragbarkeit der mit Standzylindern erhaltenen Sedimentationsgeschwindigkeiten auf die Nacheindicker und Schlammstapelbehälter erscheint deswegen ausgeschlossen, da für die Fermentationen zuvor gefrorener Klärschlamm zur Verwendung kam (der Einfriervorgang könnte die physikalischen Eigenschaften des frischen Klärschlammes verändern) und zum anderen die Wandreibung von Sedimentationsgefäßen erst ab 30 cm Innendurchmesser vernachlässigt werden kann (Stuhlmann, 1972).

Zur Ermittlung des Absetzverhaltens wurde der dem Fermenter entnommene Faulschlamm auf 3 Glas-Standzylinder mit einer Füllhöhe von 18 cm und einem Innendurchmesser von 22 cm verteilt, stündlich die Sedimentationshöhe registriert und nach 2, 4 und 24 Stunden Sedimentationszeit jeweils aus einem der 3 Standzylinder mit einer Pipette das überstehende Faulwasser zur Bestimmung der TS, der oTS und des CSB entnommen.

Sedimentationscharakteristik bei längeren Verweilzeiten (11 und 22 Tage)

Die Sedimentationsgeschwindigkeiten der im thermophilen Bereich (50°C, 56°C, 60°C) stabilisierten Schlämme waren, unabhängig vom verwendeten Klärschlamm, dem Rührmodus und der Fermentergröße, signifikant höher (Tab. 24 u. 25, Abb. 28) als die der mesophil vergorenen Schlämme.

Tab. 24: Sedimentationseigenschaften von meso- und thermophil vergorenem Klärschlamm (Schlammcharge 1)

Ferm. temp.	Verw. zeit Tage	Sed. zeit h	CSB g O ₂ /l	TS g/l	oTS g/l	SEDIMENT					ÜBERSTAND						
						ml/l	CSB g O ₂ /l	oTS g/l	CSB ges.	oTS ges.	ml/l	CSB g O ₂ /l	oTS g/l	CSB ges.	oTS ges.	CSB %	oTS %
30°C	11 a	2	25,5	20,1	12,2	930	27,0	12,9	25,1	12,0	70	5,1	2,9	0,4	0,2	1,4	1,7
		4				780	31,4	14,9	24,5	11,5	220	4,6	2,7	1,0	0,6	4,0	4,8
		24				340	68,2	31,8	23,2	10,8	660	3,5	2,1	2,3	1,4	9,1	10,5
	11 c	2	27,0	20,9	13,0	870	30,4	14,4	26,5	12,6	130	5,8	3,4	0,6	0,4	2,0	3,4
		4				705	36,0	17,2	25,4	12,1	295	5,5	3,1	1,6	0,9	6,0	7,0
		24				340	71,3	33,2	24,2	11,3	660	4,2	2,6	2,8	1,7	10,3	13,2
35°C	11 a	2	25,5	20,1	12,2	900	27,9	13,2	25,1	11,9	80	5,4	3,0	0,4	0,2	1,7	2,0
		4				750	32,4	15,3	24,3	11,5	250	4,7	2,7	1,2	0,7	4,5	5,6
		24				330	70,3	32,6	23,2	10,7	670	3,5	2,1	2,3	1,4	9,0	11,6
	5 a	2	28,5	21,0	13,1	470	50,6	22,5	23,8	10,6	510	9,2	5,0	4,7	2,6	16,5	19,5
		4				370	61,6	27,1	22,8	10,0	630	9,0	4,9	5,7	3,1	20,0	23,6
		24				250	88,4	38,2	22,1	9,6	740	8,7	4,8	6,4	3,6	22,5	27,1
50°C	11 a	2	25,0	19,7	11,8	480	43,5	20,4	20,9	9,8	520	7,9	3,9	4,1	2,0	16,4	17,2
		4				450	46,2	21,6	20,8	9,7	550	7,7	3,8	4,2	2,1	17,0	17,7
		24				360	59,2	27,4	21,3	9,9	640	5,8	3,0	3,7	1,9	15,0	16,3
	5 a	2	27,5	20,5	12,6	600	41,0	18,5	24,6	11,1	400	7,3	3,6	2,9	1,4	11,0	11,5
		4				530	45,7	20,6	24,2	10,9	470	7,0	3,5	3,3	1,7	12,0	13,1
		24				310	74,8	33,2	23,2	10,3	690	6,3	3,2	4,3	2,2	16,0	17,6
56°C	11 a	2	25,3	19,6	11,7	445	46,6	21,3	20,8	9,5	555	8,2	4,0	4,6	2,2	18,0	19,0
		4				410	50,3	22,9	20,6	9,4	590	7,9	3,9	4,6	2,3	18,4	19,7
		24				360	58,9	26,6	21,2	9,6	640	6,4	3,3	4,1	2,1	16,2	18,0
	11 b	2	25,5	19,7	11,8	445	46,9	21,3	20,9	9,5	555	8,3	4,2	4,6	2,3	18,1	19,8
		4				410	50,8	23,0	20,8	9,4	590	7,9	4,0	4,7	2,4	18,3	20,0
		24				360	59,4	26,7	21,4	9,6	640	6,4	3,4	4,1	2,2	16,1	18,5
50°C	11 c	2	26,8	20,6	12,7	490	45,3	21,2	22,2	10,4	510	9,0	4,5	4,6	2,3	17,1	18,1
		4				425	51,4	24,1	21,9	10,2	575	8,6	4,3	5,0	2,5	18,5	19,5
		24				360	62,2	28,7	22,4	10,3	640	6,9	3,7	4,4	2,4	16,5	18,7
	5 a	2	28,0	19,7	11,8	430	49,5	20,3	21,3	8,7	570	11,8	5,3	6,7	3,0	24,0	25,7
		4				420	50,7	20,8	21,3	8,7	580	11,6	5,2	6,7	3,0	24,0	25,7
		24				360	61,7	25,2	22,2	9,1	640	9,1	4,2	5,8	2,7	21,0	22,9

a kontinuierliche Rührung (75 Upa)

b intermittierende Rührung (6 x täglich à 15 min.)

c intermittierende Rührung (1 x täglich à 15 min.)

Das Sedimentvolumen nach 24-stündiger Absetzzeit war bestimmt vom verwendeten Klärschlamm und der Fermentationstemperatur. Bei Verwendung der Klärschlammcharge 1 war das Sedimentvolumen bei allen Fermentationstemperaturen etwa gleich und machte ca.

Tab. 25: Sedimentationseigenschaften von meso- und thermophil vergorenem Klärschlamm (Schlammchargen 2 u. 3)

Ferm. temp.	Verw. zeit Tag	Sed. zeit h	SEDIMENT					ÜBERSTAND									
			CSB g O ₂ /l	TS g/l	oTS g/l	ml/l	CSB g O ₂ /l	oTS g/l	CSB ges.	oTS ges.	ml/l	CSB g O ₂ /l	oTS g/l	CSB ges.	oTS ges.	CSB %	oTS %
35°C	22	2	27,0	27,7	15,5	940	28,4	16,3	26,7	15,3	60	5,5	3,0	0,3	0,2	1,2	
		4				840	31,2	17,9	26,2	15,0	160	5,0	2,9	0,8	0,5	3,0	
		24				470	53,4	30,4	25,1	14,3	530	3,6	2,3	1,9	1,2	7,1	
	11	2	28,3	28,2	16,0	960	29,2	16,5	28,1	15,9	40	5,6	3,1	0,2	0,1	0,8	
		4				860	32,1	18,1	27,6	15,6	140	5,2	3,0	0,7	0,4	2,6	
		24				470	57,2	31,5	26,4	14,8	530	3,6	2,3	1,9	1,2	6,8	
	4	2	33,4	29,8	17,6	720	40,3	21,5	29,0	15,5	280	15,5	7,6	4,3	2,1	13,0	
		4				630	45,0	24,0	28,4	15,1	370	13,5	6,7	5,0	2,5	15,0	
		24				430	65,6	34,7	28,2	14,9	570	9,0	4,7	5,1	2,7	15,4	
50°C	22	2	25,7	26,5	14,6	600	33,1	19,5	19,9	11,7	400	14,5	7,3	5,8	2,9	22,6	
		4				550	37,2	21,7	20,5	11,9	450	11,5	5,9	5,2	2,7	20,2	
		24				445	48,7	28,1	21,7	12,5	555	7,2	3,8	4,0	2,1	15,6	
	11	2	28,4	27,9	16,0	420	47,8	28,4	20,1	11,9	580	14,3	7,0	8,3	4,1	29,3	
		4				405	52,2	30,7	21,2	12,4	595	12,1	6,0	7,2	3,6	25,4	
		24				375	62,6	36,0	23,5	13,5	625	7,8	4,0	4,9	2,5	17,2	
	4	2	34,0	29,4	17,5	490	36,7	27,7	18,0	13,6	510	16,0	7,7	8,2	3,9	24,0	
		4				440	47,1	31,5	20,7	13,9	560	13,3	6,5	7,5	3,6	21,9	
		24				380	74,1	38,1	28,2	14,5	620	9,4	4,9	5,8	3,0	17,2	
60°C	22	2	28,9	26,8	15,1	485	41,7	23,2	20,3	11,2	515	16,9	7,5	8,7	3,9	30,1	
		4				460	45,8	25,2	21,1	11,6	540	14,6	6,5	7,9	3,5	27,2	
		24				425	53,6	28,4	22,8	12,1	575	10,7	5,3	6,2	3,1	21,3	
	11	2	31,4	27,8	16,1	415	51,0	28,2	21,6	11,7	585	16,7	7,5	9,8	4,4	31,2	
		4				400	55,8	30,2	22,3	12,1	600	15,1	6,7	9,1	4,0	28,9	
		24				370	66,0	34,5	24,4	12,8	630	11,0	5,3	6,9	3,3	22,1	
	4	2	34,5	29,2	17,5	420	57,6	31,0	24,2	13,0	580	17,8	7,7	10,3	4,5	29,9	
		4				390	64,1	33,9	25,0	13,2	610	15,9	7,0	9,5	4,3	27,5	
		24				305	82,3	43,3	25,1	13,2	695	13,5	6,2	9,4	4,3	27,2	

Schlammcharge 2: Verweilzeit 11 und 4 Tage

Schlammcharge 3: Verweilzeit 22 Tage

kontinuierliche Rührung (75 Upm)

35 % des Gesamtvolumens (Sediment plus Faulwasser) aus. Bei Verwendung der Schlammchargen 2 u. 3 nahm das Sedimentvolumen zu, war jedoch bei den mesophil fermentierten Schlämmen um 25 % bzw. 10 % höher als bei den thermophil vergorenen Schlämmen.

Die organische Belastung (oTS bzw. CSB) im Sedimentationsüberstand der thermophilen Ausläufe war grundsätzlich höher. Nach 24-stündiger Absetzzeit befanden sich, abhängig vom verwendeten

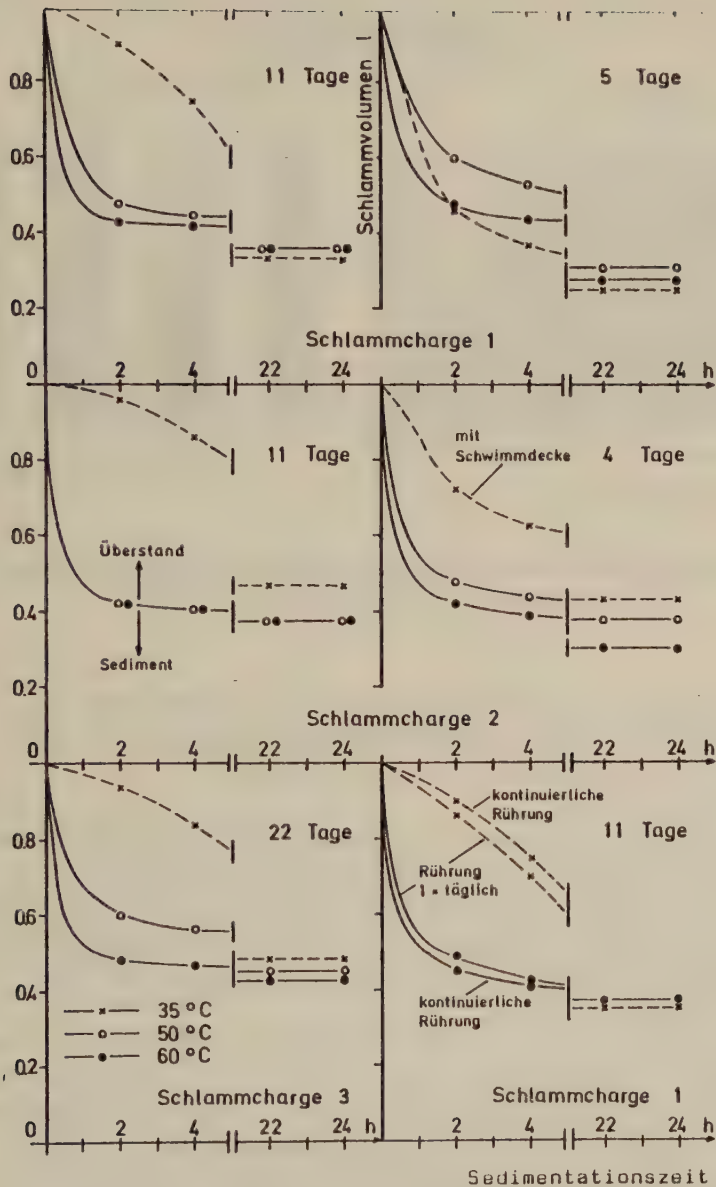


Abb.28: Sedimentationskinetiken bei unterschiedlichen Fermentationstemperaturen und Schlammverweilzeiten

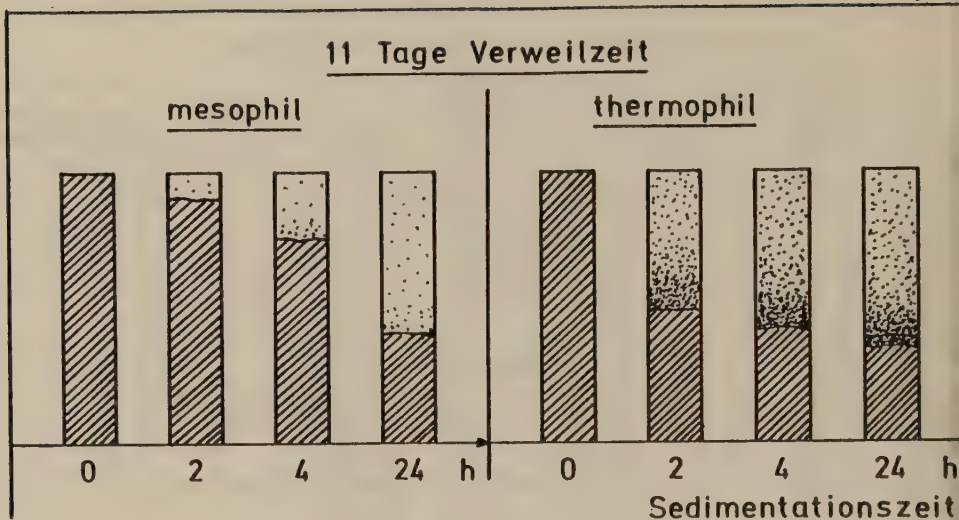


Abb. 29: Optische Charakteristik des sedimentierenden Faulschlammes bei längeren Verweilzeiten

Klärschlamm, im thermophilen Bereich bei 60°C ca. 20 - 23 %, bei 50°C ca. 15 - 17 %, im mesophilen Bereich bei 35°C ca. 8 - 10 % der gesamten oTS im Faulwasser.

Der mesophil fermentierte Schlamm machte, was die Schlammflocken-Charakteristik angeht, einen homogenen Eindruck. Die Schlammflocken schienen mehr oder weniger die gleiche Struktur und Größe zu besitzen und setzten sich langsam, aber gleichmäßig ab. Das Überstehende Faulwasser sah relativ klar aus (Abb. 29).

Die sich beim thermophil fermentierten Schlamm rasch absetzenden Schlammflocken machten ebenfalls einen homogenen Eindruck, schienen jedoch im Durchschnitt etwas größer zu sein als die im mesophilen Bereich. Das Überstehende Faulwasser war trübe und enthielt offensichtlich einen hohen Anteil kolloider Bestandteile. Aus diesem, durch einen Trübungsgradienten ausgezeichneten Faulwasser, schieden sich im Laufe der Sedimentation kleinere Partikel auf den schnell sedimentierenden

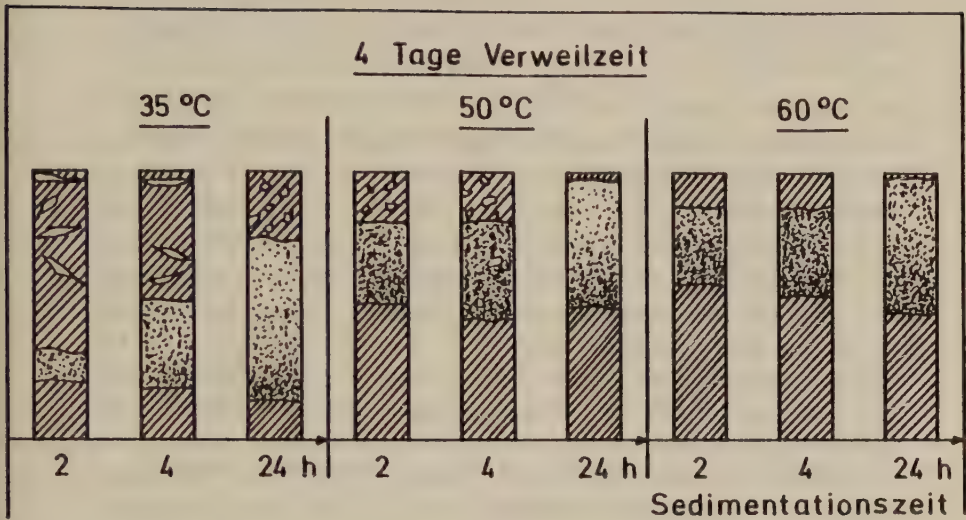


Abb. 30: Optische Charakteristik des sedimentierenden Faulschlammes bei kurzen Verweilzeiten

großen Schlammflocken ab, so daß schließlich das Sediment zwei feste Phasen unterschiedlicher Dichte aufwies (Abb. 29).

Sedimentationscharakteristik bei kurzen Verweilzeiten (4 und 5 Tage)

Die Sedimentationsgeschwindigkeit der im mesophilen Bereich bei kurzen Verweilzeiten von 4 - 5 Tagen fermentierten Schlämme nahm im Vergleich zu den längeren Verweilzeiten signifikant zu; im Gegensatz dazu waren bei den thermophilen Temperaturen keine nennenswerten Unterschiede festzustellen (Tab. 24 u. 25, Abb. 28).

Das Sedimentvolumen nach 24-stündiger Absetzzeit nahm bei allen Fermentationstemperaturen mehr oder weniger deutlich ab und war, abhängig von der Schlammcharge, bei 35°C um 14 - 25 %, bei 50°C um 0 - 14 % und bei 60°C um 18 - 22 % geringer. Die Belastung des Überstandes an organischen Stoffen nach 24-stündiger Absetzzeit nahm bei allen Temperaturen im Vergleich zu den längeren Verweilzeiten zu, bei 50°C um 15 - 20 %, bei

60°C um 25 - 30 % und besonders deutlich bei 35°C, wo eine Zunahme der organischen Belastung von 120 - 150 % festzustellen war.

Die mesophil vergorenen Schlämme zeigten bei den niedrigen Verweilzeiten ähnliches Absetzverhalten wie die im thermophilen Bereich fermentierten Schlämme. Die sich rasch absetzenden Feststoffe wiesen im Gegensatz zu den Partikeln im Schwimmschlamm eine relativ einheitliche Flockenstruktur auf. Im Laufe der Sedimentation schieden sich kleinere Teilchen aus dem trüben Faulwasser auf den schnell sedimentierenden großen Schlammflocken ab. Dazu kamen noch Fraktionen aus dem Schwimmschlamm, so daß nach 1-tägiger Absetzzeit das Gesamt-Sediment einen inhomogenen Eindruck machte.

Die Sedimentationscharakteristik der thermophil vergorenen Schlämme entsprach grundsätzlich der bei den längeren Verweilzeiten. Bei Klärschlammcharge 3 waren im Sediment, ebenso wie beim mesophil fermentierten Schlamm, Teile der ursprünglich dickeren inhomogenen Schwimmdecke enthalten (Abb.30).

Diskussion

Die Versuchsergebnisse zeigen einen deutlichen Unterschied im Sedimentationsverhalten der bei längeren Verweilzeiten (11 - 22 Tage) im meso- und thermophilen Bereich stabilisierten Schlämme. Die für die Praxis wesentlichsten Befunde dürften hierbei die signifikant höhere Sedimentationsgeschwindigkeit der thermophil vergorenen Schlämme sowie die höhere Konzentrierung der Feststoffe (höheres spezifisches Gewicht) in der ersten Sedimentationsphase sein, da sie zu Kosteneinsparungen bei den Eindickungsverfahren führen könnten. Dies betreffe sowohl die Investitionskosten (z.B. geringere Zentrifugengröße) als auch die Betriebskosten (z.B. kürzere Zentrifugationszeit, geringerer Bedarf an Flockungsmitteln) und die Transportkosten (geringeres Volumen des eingedickten Schlammes).

Zu Kostenvergleichs-Zwecken ist es wichtig zu wissen, daß

die Sedimentationscharakteristika in beiden Temperaturbereichen für Schlämme, die bei kontinuierlicher und intermittierender Rührung fermentiert wurden, gleichermaßen gelten (Tab. 24, Abb. 28).

Der höhere Gehalt organischer Stoffe im Faulwasser der thermophil stabilisierten Schlämme muß nicht unbedingt ein gravierender Nachteil sein, da dieses in der Regel in die ausreichend dimensionierten Vorklärbecken bzw. in die Belebungsanlage geleitet wird, wo die organischen Inhaltsstoffe dem aeroben Abbau zugänglich werden.

Ein Charakteristikum der bei den kurzen Verweilzeiten von 4 und 5 Tagen fermentierten Schlämme ist die bei allen Fermentationstemperaturen feststellbare, im mesophilen Bereich besonders ausgeprägte Tendenz zur Ausbildung von Schwimmschichten. Da im allgemeinen Schwimmschichten bei der weiteren Schlamm aufbereitung große Schwierigkeiten bereiten, ist auch aus diesem Grund die Anwendbarkeit extrem kurzer Verweilzeiten für den Praxisbetrieb problematisch.

I. Hygienisierungseffekt bei mesophilen und thermophilen Temperaturen

Aufgrund der bodenverbessernden Wirkung und des hohen Gehalts an Mineralien findet die landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlämmen weite Verbreitung und nicht zuletzt wegen dieser Eigenschaften werden beispielsweise in der Bundesrepublik Deutschland bis zu 40 %, in den Niederlanden und in der Schweiz sogar 70 % der anfallenden Schlämme entsprechend genutzt (Bundesministerium des Innern, 1981).

Der landbaulichen Verwertung eines Klärschlammes können allerdings Grenzen gesetzt sein. Neben toxischen Inhaltsstoffen wie verschiedenen Schwermetallen spielen vor allem seuchenhygienische Gesichtspunkte bei der Beurteilung der Eignung eines Schlammes als landwirtschaftlicher Dünger eine Rolle. Dadurch, daß sich im Laufe des Abwasserreinigungsprozesses die von Menschen und Tieren ausgeschiedenen und in Abwasser gelangenden Krankheitserreger im Rohschlamm anreichern (Danielsson, 1977; Yaziz u. Lloyd, 1978), sind Schlämme, die vor der Ausbringung nicht desinfiziert wurden, grundsätzlich als hygienisch bedenklich einzustufen. Salmonellen, die als die gefährlichsten Abwasserkontaminanten gelten, konnten nach Untersuchungen in Schweden in etwa 40 % der bei mesophilen Temperaturen anaerob stabilisierten Schlämme nachgewiesen werden (Danielsson, 1975), während in der Schweiz von 29 überprüften Kläranlagen im Durchschnitt sogar 90 % der Faulschlämme Salmonellen enthielten (Hess u. Breer, 1975). Beweise für epidemiologische Zusammenhänge zwischen Klärschlammdüngung und Salmonelleninfektion in Rinderbeständen ergaben sich in der Schweiz nach einer Auswertung von fast 14.000 Untersuchungen während eines Zeitraumes von 6 Jahren (Hess u. Breer). Wegen der hohen Ansteckungsrisiken, die ein ungenügend hygienisierter Schlamm in sich birgt, muß deshalb neben der Forderung nach Stabilisierung und Konditionierung des Frischschlammes durch geeignete Prozeßführung auch die Hygienisierung des Faulgutes ein Hauptanliegen der Klärschlammbehandlung sein.

Tab. 26: Abdtötungsverhalten von Krankheitserregern bei unterschiedlichen Temperaturen nach Angaben verschiedener Autoren

Organismengruppe	Organismus	Substrat	Fern.Temp. (°C)	Einwirkungs-dauer	Überlebens-rate	D ₉₀ -Wert	Autor
Eukaryotische Krankheitserreger	Ascaris(Eier)	Klärschlamm	55	10 Min.	0	-	Rudolfs(1950)
	Ascaris(Eier)	Klärschlamm	55	7 Min.	0	-	Jettmar(1950)
	Helminthen (Eier)	Klärschlamm	35	18 Tage	20 %	-	Popova u. Bolotina (1962)
			51	9 Tage	0	-	
	Hexatoden	Klärschlamm	55	10 Min.	0	-	Forstner(1974)
	Strongyloiden		55	10 Min.	0	-	
	Coccidien		35	10 Min.	0	-	
	Ascaris(Eier)	Klärschlamm	38	25 Tage	77 %	-	Fitzgerald u. Ashley (1977)
	Coccidien		38	4-5 Tage	0	-	
	Ascaris(Eier)	Klärschlamm	60	30 Min.	0	-	Hays (1977)
	Ascaris(Eier)	Klärschlamm	20	6 Monate	10 %	-	Stafford (1980)
			30	30 Tage	0	-	
			45	20 Tage	0	-	
			55-60	30 Min.	0	-	
Viren	Trichostrongyloiden	Klärschlamm	35	2-3 Tage	0	-	Much u. Schlundt (1983)
			55	<24 Std.	0	-	
	Ascaris(Eier)	Rindergülle	25	6 Wochen	0	-	Plym-Forsell (1983)
			55	<24 Std.	0	-	
	Poliioviren	Faulwasser	25	-	-	7 Std.*	Ward u. Ashley (1977)
			40	-	-	30 Min.	
			45	-	-	15 Min.	
			51	-	-	3 Min.	
	Reoviren	Faulschlamm	45	-	-	5 Min.*	(1977)
			60	-	-	4 Min.	
	Rotaviren	Faulschlamm	40	-	-	90 Min.*	(1980)
			45	-	-	45 Min.	
			50-55	-	-	<5 Min.	
	Echovirus 11	Klärschlamm	35	-	-	45 Std.*	Bertucci (1977)
Bakterien	Poliiovirus 1		35	-	-	24 Std.	
	Coxsackievirus 3-4		35	-	-	24 Std.	
	Echovirus 1	Klärschlamm	37	-	-	40 Std.*	Hays (1977)
	Poliiovirus 1		37	-	-	12 Std.	
	Coxsackievirus A-9		37	-	-	24 Std.	
	In Schlamm sich "natürlich" befindende Viren	Klärschlamm	35	20 Tage	10 %	20 Tage	Berg u. Berman (1980)
			49	20 Tage	0,1 %	ca 7 Tage	
	Coxsackievirus	Rinder- u. Schweinegülle	33	-	-	48 Std.	Lund (1983)
			53	-	-	30 Min.	
	Salm. typhi	Klärschlamm	55	-	-	5-6 Min.	Lee u. Riemann (1971)
	Salm. paratyphi		55	-	-	5-6 Min.	
	Salm. enteritidis		55	-	-	5-6 Min.	
	Salm. senftenberg		57	-	-	31 Min.	
	Fakalcoliforme	Klärschlamm	35	20 Tage	2 %	ca 12 Tage	Berg u. Berman (1980)
Bakterien	Gesamtkoliforme		45	20 Tage	0,1-0,0001 %	3-7 Tage	
			35	20 Tage	1 %	10 Tage	
	Fakalstreptococci		49	20 Tage	0,1-0,0001 %	3-7 Tage	
			35	20 Tage	10 %	20 Tage	
			49	20 Tage	0,1 %	7 Tage	
	Gesamtkoliforme	Klärschlamm	35	ca 10 Tage	25 %	ca 17 Tage	Stafford (1980)
	Salmonella spec.		35	ca 10 Tage	30-35 %	ca 20 Tage	
	Salm. typhimurium	Rinder- u. Schweinegülle	32	3 Wochen	0	-	Willinger (1983)
	E. coli	Rinder- u. Schweinegülle	21	-	-	2 Wochen	Larsen (1983)
	Salm. typhimurium		21	-	-	2 Wochen	
	E. coli	Klärschlamm	33-35	-	-	1-2 Tage	Munch u. Schlundt (1983)
	"	Rinder- u. Schweinegülle	50-59	-	-	10-90 Min.	
	S. typhimurium		33-35	-	-	2-4 Tage	
			50-59	-	-	10-90 Min.	
Bakterien	E. coli	Rindergülle	35	-	-	1 Tag	Lund (1983)
	"		50-53	-	-	30-60 Min.	
	S. typhimurium		35	-	-	2 Tage	
			50-53	-	-	30-70 Min.	
	S. senftenberg	Rindergülle	25	5 Wochen	0	- P	Plym-Forsell (1983)
	S. typhimurium		55	24 Std.	0	-	
	E. coli	Schlachthofabfälle	35	-	-	10,5 Std	Steiner (1983)
	"		55	-	-	20 Min.	
	S. typhimurium		55	-	-	40 Min.	

* aus den vorliegenden Daten selbst errechnet

Als Alternative zu anderen Desinfektionsverfahren wie z.B. der chemischen Stabilisierung des Schlammes, der Pasteurisierung, oder Behandlung des Schlammes mit Hilfe von Gamma-Strahlen wird heute die anaerobe thermophile Schlammfäulung diskutiert. Durch die erhöhte Prozeßtemperatur wäre eine beschleunigte Abtötung der pathogenen Keime zu erwarten, so daß auch bei halbkontinuierlichem Betriebsmodus ein ausreichender Hygienisierungseffekt eintreten sollte.

Nach den vorliegenden Ergebnissen werden bei thermophilen Temperaturen zwischen 55°C und 60°C Wurmparasiten bzw. deren Entwicklungsstadien bereits nach einigen Minuten abgetötet. Auch Viren, mit Ausnahme der "natürlich" im Schlamm vorkommenden, sowie verschiedene pathogene Bakterien unterliegen bei thermophilen Temperaturen einer raschen Abtötung (Tab. 26).

Stellvertretend für die als Krankheitserreger in Betracht kommenden Salmonellen wurde bei unseren Versuchen *Escherichia coli* als Testkeim eingesetzt, da dieser Keim, wie aus mehreren Untersuchungen hervorgeht, zumindest im thermophilen Temperaturbereich eine den Salmonellen ähnliche Temperaturempfindlichkeit aufweist (Munch u. Schlundt, 1983; Lund, 1983). Die ermittelten Absterberaten sollten deshalb, zumindest näherungsweise, auch für Salmonellen Gültigkeit haben.

Ergebnisse

Überprüft wurden die Absterberaten von *E. coli* (ATCC 25 922) bei sechs Fermentationstemperaturen zwischen 22°C und 50°C.

Zur Ermittlung der Abtötungszeiten wurde *E. coli* zunächst 20 Stunden in HD-Medium inkubiert und ein Teil der dicht bewachsenen Bakteriensuspension zusammen mit Frischschlamm in die bei verschiedenen Temperaturen betriebenen Fermenter gegeben. Sofort nach Durchmischung des Fermenterinhalt sowie nach verschiedenen Zeitintervallen wurden Schlammproben entnommen, Verdünnungsreihen hergestellt und in Parallelproben auf Endo-Agar ausplattiert. Die Auszählung der Kolonien erfolgte nach 24-stündiger Bebrütung bei 37°C. Zur Absicherung der Ergeb-

Tab. 27: Abtötung von *Escherichia coli* bei mesophilen und thermophilen Fermentationstemperaturen
Substrate: Klärschlammcharge 3 und Schweinegülle

Fermentationssubstrat		Klärschlamm						Schweinegülle
Fermentationstemperatur		22°C	28°C	35°C	40°C	45°C	50°C	35°C
Keimzahlen von <i>E.coli</i> /ml Schlamm nach Std.	0	$1,1 \times 10^7$	$1,1 \times 10^7$	$1,1 \times 10^7$	$1,1 \times 10^7$	$1,1 \times 10^7$	$1,1 \times 10^7$	$1,1 \times 10^7$
	1	.	.	.	.	$9,0 \times 10^6$	$1,9 \times 10^6$	.
	1,5	.	.	.	.	.	$1,1 \times 10^5$	.
	2	.	.	.	.	$5,0 \times 10^6$	$2,4 \times 10^4$	.
	3	.	.	.	.	.	$1,9 \times 10^3$	.
	4	.	.	$8,7 \times 10^6$	$6,9 \times 10^6$	$4,4 \times 10^5$	$1,0 \times 10^3$	$7,1 \times 10^6$
	6	.	.	.	.	$6,3 \times 10^3$	.	.
	8	.	.	$5,7 \times 10^6$	$1,2 \times 10^6$	$4,6 \times 10^2$	.	$2,0 \times 10^6$
	12	.	.	$2,1 \times 10^6$	$2,4 \times 10^5$	.	.	$3,1 \times 10^5$
	24	$8,2 \times 10^6$	$1,1 \times 10^6$	$6,3 \times 10^4$	$8,6 \times 10^2$	.	.	$2,1 \times 10^3$
	36	.	$3,9 \times 10^5$	$3,9 \times 10^3$	.	.	.	.
	48	$5,0 \times 10^6$	$6,5 \times 10^4$	.	.	.	.	.
	72	$3,5 \times 10^6$	$6,0 \times 10^3$	.	.	.	.	.
	96	$2,0 \times 10^6$	.	.	.	.	.	.
D_{10} - Wert		115 Std.	20 Std.	8 Std. 20 Min.	4 Std. 50 Min.	1 Std. 15 Min.	45 Min.	5 Std. 20 Min.
pH - Wert		7,20	7,35	7,40	7,45	7,50	7,55	7,80

nisse wurden die Versuche bei jeder der getesteten Temperaturen mindestens einmal wiederholt.

Fermentationssubstrat bei allen Temperaturen war Klärschlamm (Schlammcharge 3, Verweilzeit 11 Tage), bei 35°C wurde neben Klärschlamm noch Schweinegülle (Verweilzeit 22,5 Tage) als Gärsubstrat eingesetzt.

Bei Vorversuchen wurde sichergestellt, daß Bakterien, die in der Lage sind, auf Endo-Agar zu wachsen, im Schlamm nur in sehr geringen Konzentrationen vorhanden waren (mesophil: ca. 10^2 Keime/ml, thermophil: ca. 10 Keime/ml) und somit die Auszählergebnisse nicht verfälschen konnten. Bei der Auswertung wurden die durch den täglichen Substrataustausch verursachten Verdünnungen der Keime durch entsprechende Korrekturen berücksichtigt.

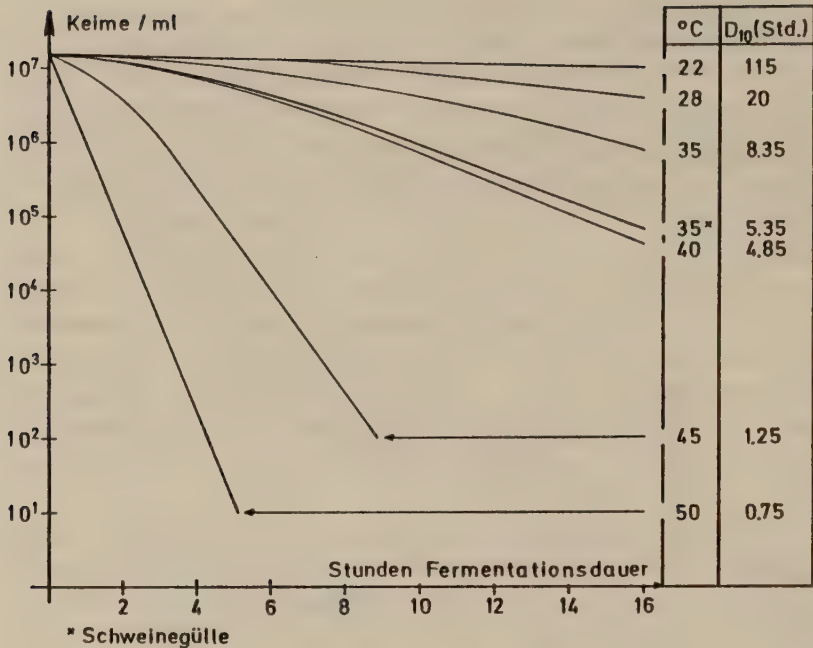


Abb. 31: Abtötung von *Escherichia coli* bei mesophilen und thermophilen Fermentationstemperaturen
Substrate: Klärschlammcharge 3 und Schweinegülle

Die Werte für die Abtötungszeiten von *E. coli* sind in Tabelle 27 zusammengefaßt und in Abbildung 31 graphisch dargestellt.

Wie aus den Werten ersichtlich ist, erwiesen sich die Keime bei 22°C mit einer dezimalen Abtötungsrate von ca. 5 Tagen als außerordentlich stabil. Auch bei 28°C erfolgte mit einem D₁₀-Wert von 20 Stunden eine verhältnismäßig langsame Abtötung und selbst bei höheren mesophilen Temperaturen dauerte es noch einige Stunden (35°C: ca. 8,5 Stunden; 40°C: ca. 5 Stunden), bis 90 % der eingesetzten Keime abgetötet waren. Ein rascher Abtötungseffekt trat erst ab 45°C ein (D₁₀: 75 min.).

Bei Fermentationstemperaturen von 35°C wurden die Keime in Schweinegülle (D_{10} : 5 Std. 20 min.) wesentlich rascher abgetötet als in Klärschlamm (D_{10} : 8 Std. 20 min.).

Bei allen überprüften Fermentationstemperaturen mit Ausnahme von 50°C erfolgte die logarithmische Abtötung der Keime erst nach einer lag-Phase.

Diskussion

Das Vorhandensein einer lag-Phase, wie sie auch von anderen Autoren beobachtet wurde (Munch u. Schlundt, 1983), deutet darauf hin, daß bis zu etwa 45°C nicht die Temperatur selbst, sondern ungünstige Lebensbedingungen im Fermenter, möglicherweise bestimmte Schlamminhaltstoffe, ursächlich für das Absterben der Keime sind.

Der Einfluß verschiedener Fermentationssubstrate auf die Abtötungszeiten von *E. coli* wird bei einem Vergleich der D_{10} -Werte deutlich (Tab. 28). Setzt man die Absterberaten von *E. coli* in Relation zueinander, ergeben sich in der Reihenfolge Rindergülle - Klärschlamm - Schweinegülle fallende D_{10} -Werte mit Rindergülle als mildestem und Schweinegülle als aggressivstem Substrat für *E. coli*. Diese Reihenfolge sollte nach den Ergebnissen von Munch u. Schlundt (1983) auch für Salmonellen Gültigkeit haben, wenngleich sich die Salmonellen mit D_{10} -Werten von 2 Tagen (Klärschlamm) und 4 Tagen (Rindergülle) bei mesophilen Temperaturen zwischen 33°C und 35°C als wesentlich widerstandsfähiger erwiesen als die untersuchten *E. coli*-Stämme (Tab. 28).

Die häufig vertretene Ansicht, ausschlaggebend für die Abtötungsgeschwindigkeit wäre der pH-Wert des Mediums sowie die Ammoniakkonzentration, scheint nach diesen Ergebnissen nicht zuzutreffen. So werden im Vergleich zu Rindergülle die Keime im Faulschlamm wesentlich rascher abgetötet, obwohl fermentierte Rindergülle sowohl einen höheren pH-Wert als

Tab. 28: Abtötungsverhalten von *Escherichia coli* und *Salmonella typhimurium* in verschiedenen Fermentationssubstraten bei meso- und thermophilen Temperaturen

Organismus	Art des Schlammes	Fermentations-temp. (°C)	Dezimale Reduktionszeit (D ₁₀ -Wert)	Autor
<i>Escherichia coli</i> Serotyp 08	Klärschlamm	33	17 - 20 Std.	Munch u. Schlundt (1983)
	Rindergülle	33	ca 24 Std.	
	Klärschlamm	53	ca 50 Min.	
<i>Salmonella typhimurium</i>	Klärschlamm	33	ca 2 Tage	
	Rindergülle	33	ca 4 Tage	
	Klärschlamm	53	ca 45 Min.	
	Rindergülle	53	ca 45 Min.	
<i>Escherichia coli</i> ATCC 11 775	Schlachthof-abfälle	35	ca 10,5 Std.	Steiner (1983)
		55	ca 20 Min.	
<i>Salmonella typhimurium</i>	Schlachthof-abfälle	55	ca 45 Min.	
<i>Escherichia coli</i> ATCC 25 922	Klärschlamm	35	ca 8,5 Std.	eigene Versuche
	Schweinegülle	35	ca 5,5 Std.	
	Klärschlamm	50	ca 45 Min.	

auch höhere NH_3 -Konzentrationen aufweist. Neben Ammoniak muß es demnach noch andere Schlamminhaltstoffe geben, die einen Einfluß auf die Abtötungsrate haben; bei Schweinegülle als Substrat mit dem größten Abtötungseffekt könnten dies unter anderem Phenole, Indole und Sketole sein, die hier, verglichen mit den anderen aufgeführten Gärsubstraten, in höherer Konzentration vorliegen (van Velsen u. Lettinga, 1979).

Wie das Fehlen einer lag-Phase bzw. die sofortige lineare Abnahme der Keimzahlen bei 50°C zeigt, sollte in diesem Bereich ausschließlich die Temperatur für die Abtötung der Keime verantwortlich sein. Dies zeigt auch ein Vergleich der Abtötungsraten von *E. coli* in verschiedenen Gärsubstraten (Tab. 28). Nach diesen Ergebnissen dürfte bei Fermentationstemperaturen ab etwa 50°C, unabhängig vom verwendeten Substrat, ein D₁₀-Wert von 1 Stunde für *E. coli* und *Salmonellen* nicht überschritten werden.

Statistisch gesehen, werden bei dieser Abtötungsrate (D_{10} : 1 Std.) Salmonellen, die als Richtkeime für die Gefährdung durch einen Klärschlamm angesehen werden und von den in Frage kommenden Krankheitserregern mit ca. 10^5 - 10^6 Keimen pro Liter Frischschlamm die höchste Konzentration aufweisen, innerhalb von acht Stunden bis auf 1 Keim/ m^3 Schlamm abgetötet.

Um in thermophil betriebenen Faulanlagen einen Desinfektionseffekt in diesem Ausmaß zu erreichen, ist es natürlich erforderlich, daß die Keime ausreichend lange den hohen Temperaturen ausgesetzt sind, was zugleich einen kontinuierlichen Betriebsmodus ausschließt. Wie dieses Beispiel zeigt, sollten allerdings acht bis zehn Stunden Einwirkungsdauer genügen, so daß spätestens nach dieser Zeit wieder ein Substrataustausch erfolgen könnte und somit ein Betrieb in halbtägigem Turnus ermöglicht wäre. Werden im Faulschlamm höhere Konzentrationen pathogener Keime als die bei diesem Beispiel als vertretbar angesehen, könnten sich die Zugabeintervalle noch weiter verringern.

Neben der Forderung nach halbkontinuierlicher Prozeßführung sollte zur Erreichung eines hinreichenden Abtötungseffektes noch ein weiterer Punkt Beachtung finden. Um die Möglichkeit einer Durchmischung von Frisch- und Faulschlamm während der Substratzugabe auszuschließen, dürfte der Austausch nicht nach dem Verdrängungsprinzip erfolgen, vielmehr müßte die Entnahme des bereits fermentierten Schlammes der Einbringung von Frischschlamm vorgeschaltet sein.

Wird die anaerobe thermophile Klärschlammbehandlung nicht nur als Stabilisierungs- und Konditionierungsverfahren verstanden, sondern auch bzw. vor allem als eine Möglichkeit der Schlamm-desinfizierung betrachtet, so sollten Prozeßtemperaturen im oberen thermophilen Bereich (ca. 55°C , jedoch mindestens 50°C) gewählt werden, da, wie aus eigenen Versuchen und Untersuchungsergebnissen anderer Autoren zu entnehmen ist, die Abtötungsgeschwindigkeit verschiedener Krankheitserreger im unteren thermophilen Bereich (45°C) bereits deutlich abnimmt.

Davon ausgehend, daß die eben besprochenen Punkte beim Betrieb der Anlage beachtet werden, sollte die anaerobe thermophile Schlammfaulung bei Temperaturen zwischen 50°C und 60°C eine echte Alternative zu den bereits erwähnten Desinfektionsverfahren sein mit dem Vorteil, ohne zusätzliche Investitions-, Betriebs- und Personalkosten einen hygienisch einwandfreien Schlamm zu liefern, der unter Beachtung anderer Anwendungskriterien bedenkenlos und ohne Ansteckungsrisiken als landwirtschaftlicher Dünger eingesetzt werden kann.

IV. Schlußbemerkung

Die optimistischen Erwartungen, durch Methangärung bei thermophilen (45°C - 60°C) Temperaturen einen rascheren Abbau der organischen Substanz zu erreichen und über höhere Durchsatzraten zu einer Reduzierung der Faulraumvolumina zu kommen, haben sich nach unseren Untersuchungen nicht bestätigt. Wohl aber deuten die Versuchsergebnisse die Möglichkeit an, Faultürme grundsätzlich - auch im mesophilen Bereich - bei wesentlich höheren Raumbelastungen bzw. niedrigeren Schlammverweilzeiten zu betreiben als es derzeit in der Praxis üblich ist. Da bei unseren Versuchen im Labormaßstab selbst bei Verweilzeiten von 4 Tagen und Raumbelastungen von über $8 \text{ g oTS/l} \cdot \text{Tag}$ noch stabile Fermentationen mit guten Abbausergebnissen und Gasausbeuten möglich waren, wäre eine Verkürzung der Haltezeiten bei Fermentationen im großtechnischen Maßstab - mit hinreichender Reserve an Betriebssicherheit und bei ausreichendem Stabilisierungsgrad des Faulgutes - bis auf etwa 10 Tage (Raumbelastungen zwischen ca. 3 und $5 \text{ kg oTS/m}^3 \cdot \text{Tag}$) vorstellbar.

Entgegen früheren Befürchtungen zeichnen sich Fermentationen bei thermophilen Temperaturen durch eine sehr hohe Prozeßstabilität aus. Die Anforderungen, die in der Praxis an die Betriebssicherheit zu stellen sind, können deshalb mit Sicherheit erfüllt werden. Da bei mesophilen Temperaturen die im Frischschlamm enthaltenen Krankheitserreger nicht in ausreichendem Maße abgetötet werden und die an die mesophile Faulung angekoppelten Desinfektionsverfahren (Pasteurisierung, thermische Konditionierung, Gamma-Bestrahlung) mit sehr hohen Kosten verbunden sind, sollte vor allem dann, wenn die Verwendung des vergorenen Schlammes als landwirtschaftlicher Dünger angestrebt wird, eine Behandlung des Klärschlammes bei thermophilen Temperaturen in Betracht gezogen werden.

Die im Vergleich zum mesophilen Verfahren höheren Energiekosten könnten durch eine verbesserte Isolierung und durch Einsatz von Wärmetauschern zwischen Zu- und Ablauf verringert werden; wirtschaftliche Vorteile können sich durch die besseren Entwässerbarkeitseigenschaften des thermophil vergorenen Schlammes ergeben.

Wann auch nach unseren Untersuchungen die thermophile Klärschlammbehandlung nicht alle ursprünglichen Erwartungen erfüllen kann, scheint sie doch unter bestimmten Umständen eine wirtschaftliche Alternative zum konventionellen mesophilen Verfahren zu sein.

V. Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Leistungsfähigkeit thermophiler (45°C - 60°C) Methangärung. Die Versuche wurden im Labormaßstab (Füllvolumen der Fermenter: 1.5 l bzw. 4.5 l) durchgeführt.

Semikontinuierliche Fermentationen im thermophilen Bereich ließen sich mit kommunalem Klärschlamm und Kartoffelschlempe, jedoch nicht mit Schweinegülle erreichen.

Die Fermentationsleistungen (Abbau der organischen Substanz, Gasproduktion) waren mit Klärschlamm als Substrat bis zur höchsten überprüften Raumbelastung von etwa $10 \text{ g OTS/l} \cdot \text{Tag}$ (Verweilzeit 3 Tage) bei Temperaturen zwischen 35°C und 60°C praktisch identisch. Im Vergleich zu den mesophilen Temperaturen wurden im thermophilen Bereich Proteine etwas schneller und Fette etwas langsamer abgebaut.

In beiden Temperaturbereichen wurden die besten Fermentationsergebnisse bei schwachem kontinuierlichem Rührbetrieb erzielt.

Sowohl die mesophilen als auch die thermophilen Fermentationsansätze zeigten sich relativ unempfindlich gegenüber Stoßbelastungen; sehr hohe Belastungsstöße konnten allerdings bei den thermophilen Temperaturen besser abgepuffert werden.

In beiden Temperaturbereichen erwies es sich als nicht notwendig, bei Wiederinbetriebnahme des Gärreaktors nach einer Fütterungspause von einer Woche die ursprüngliche Raumbelastung zu reduzieren.

Mit Ausnahme einer Erhöhung der Solltemperatur um 3°C für mehrere Tage im thermophilen Bereich (50°C und 60°C) hatten sowohl kurz- als auch langfristige Änderungen der Fermentationstemperatur keine negativen Auswirkungen auf die weitere Fermentation.

Unabhängig von der Fermentationstemperatur, wies der Faulschlamm aus hochbelasteten Fermentern eine höhere potentielle Gäraktivität (höhere Biomasse) auf als der aus schwachbelasteten Fermentern.

Unabhängig vom verwendeten Klärschlamm und dem Belastungszustand der Fermenter, war die Geruchsqualität der thermophil vergorenen Schlämme deutlich schlechter als die der bei mesophilen Temperaturen fermentierten Schlämme.

Im Vergleich zu den mesophil vergorenen Schlämmen wiesen die im thermophilen Bereich fermentierten Schlämme bei längeren Verweilzeiten (11-22 Tage) deutlich höhere Sedimentationsgeschwindigkeiten und eine höhere Schmutzfracht im Faulwasser auf. Bei kurzen Verweilzeiten (4 Tage) glich sich das Sedimentationsverhalten der bei verschiedenen Temperaturen fermentierten Schlämme an.

Die Tendenz zur Schwimmdeckenbildung nahm mit sinkenden Verweilzeiten und abnehmenden Fermentationstemperaturen zu.

Eine rasche Abtötung der *Escherichia coli* - Keime (Modellkeim für Salmonellen) erfolgte nur bei Fermentationstemperaturen über 50°C. Die dezimalen Abtötungsraten betrugen 8.5 Stunden bei 35°C und 45 Minuten bei 50°C.

Insgesamt zeigen die Versuche, daß bei Faulanlagen in großtechnischem Maßstab auch bei mesophilem Betrieb eine Verkürzung der Haltezeiten auf etwa 10 Tage möglich sein sollte. Ein thermophiler Betrieb scheint nur dann angebracht zu sein, wenn die Hygienisierung des Faulgutes angestrebt wird.

VI. Literaturverzeichnis

- Bach, H.: Laboratoriumsversuche über den anaeroben Abbau des Klärschlammes. Ges. Ing. 51, 641 - 647 (1925).
- Berg, G., Berman, D.: Destruction by anaerobic mesophilic and thermophilic digestion of Viruses and Indicator Bacteria indigenous to domestic sludges. J. Appl. Environ. Microbiol. 39, 361 - 368 (1980).
- Bertucci, J.J., Lue-Hing, C., Zenz, D., Sedita, S.S.: Inactivation of Viruses during anaerobic sludge digestion. J. WPCF 49, 1642 - 1651 (1977).
- Beutler, H.O., Michal, G.: Neue Methode zur enzymatischen Bestimmung von Äthanol in Lebensmitteln. Fresenius' Z. Anal. Chem. 284, 113 - 117 (1977).
- Buhr, H.O., Andrews, J.F.: The thermophilic anaerobic digestion process. J. Water Res. 11, 129 - 143 (1977).
- Cooney, C.L., Ackerman, R.A.: Thermophilic anaerobic digestion of cellulosic waste. Europ. J. Appl. Microbiol. 2, 65 - 72 (1975).
- Cooney, C.L., Wise, D.L.: Thermophilic anaerobic digestion of solid waste for fuel gas production. J. Biotechnol. Bioeng. 16, 1119 - 1135 (1975).
- Danielsson, M.L.: Salmonella in sewage and sludge. Acta Vet. Scan. 65, 1 - 126 (1977).

- Fair, G.M., Moore, E.W.: Observations on the digestion of a sewage sludge over a wide range of temperatures. Sewage Wks. J. 9, 3 - 5 (1937).
- Fischer, A.J., Greene, R.A.: Plant scale tests on thermophilic digestion. J. WPCF 17, 718 - 739 (1945).
- Fitzgerald, P.R., Ashley, R.F.: Differential survival of *Ascaris* ova in wastewater sludge. J. WPCF 49, 1722 - 1724 (1977).
- Forstner, M.J.: Untersuchungen über Grenztemperaturen zur Abtötung parasitärer Entwicklungsstadien. Wasser- und Abwasserforschung 6, (1974).
- Gaddy, J.L.: Kinetics and economics of anaerobic digestion of animal wastes. J. Wat. Air a. Soil Poll. 3, 161 - 169 (1974).
- Garber, W.F.: Plant-scale studies of thermophilic digestion at Los Angeles. Sew. Ind. Wastes 26, 1202 - 1216 (1954).
- Garber, W.F., Ohara, G.T., Colbaugh, J.E., Rakesit, S.K.: Thermophilic digestion at the Hyperion Treatment Plant. J. WPCF 47, 950 - 961 (1975).
- Colueke, C.G.: Temperature effects on anaerobic digestion of raw sewage sludge. Sew. Ind. Wastes 30, 1225 - 1232 (1958).
- Hallermayer, R.: Eine Schnellmethode zur Bestimmung des Fettgehaltes in Lebensmitteln. Deutsche Lebensmittel-Rundschau 10, 356 - 359 (1976).

Hartmann, L.: Die Einsatzmöglichkeiten der thermophilen Faulung in kommunalen Kläranlagen. Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben Ha 445/7 der DFG.

Hatfield, W.D., Symons, S.E., Mills, R.R.: Gas from Sewage Sludge Digestion. Ind.Eng.Chem. 2, 174 - 183 (1928).

Hays, B.D.: Potential for parasitic disease transmission with land application of sewage plant effluent and sludges. Water Research 1, 583 - 590 (1977).

Hess, E., Breer, C.: Salmonellenepidemiologie und Grünlanddüngung mit Klärschlamm. Zbl. Bakt. Hyg. I.O.B. 161, 54 - 60 (1975).

Heukelekian, H.: Further studies on thermophilic digestion of sewage solids. Sewage Works J. 2, 219 - 227 (1930).

Heukelekian, H., Kaplovsky, A.J.: Effect of change of temperature on thermophilic digestion. Sewage Works J. 20, 806 - 816 (1948).

Hohorst, H.J.: L(+) - Lactat: Bestimmung mit Lactat-Dehydrogenase und NAD. In: Methoden der enzymatischen Analyse II (H.U. Bergmeyer, Hrsg.), 2. Auflage, 1425 - 1490, Verlag Chemie, Weinheim 1970.

Imhoff, K.: Operation results of the Essen Activated Sludge Plant. Eng. News Rec. 17, (1927).

Imhoff, K.: Temperatur und Schlammfaulung. Techn. Gemeindeblatt 7, 162 - 180 (1936).

Jettmar, H.M.: Widerstandsfähigkeit von Ascarideneiern. Bull. Schweiz. Akad. d. Wiss. 6, (1950).

Jewell, W.J.: Anaerobic fermentation of agricultural residues; potential for improvement and implementation. Final Report EY-76-S-02-2981-7, (1978).

Kandler, O.: Studie über "Stand und Möglichkeiten der Abwasserreinigung mit Hilfe thermophiler Mikroorganismen". BMFT Auftragsnummer: 01 VY 016-AA/NT/BCT 0127, (1976).

Kandler, O., Temper, U., Steiner, A., Winter, J.: Efficiency and Stability of Methane Fermentations of Wastes at Mesophilic and Thermophilic Temperatures. Paper presented at symposium on Recent Advances in Biotechnology during CHEMTECH + ORT' 83 Conference, New Delhi, Feb. 1983.

Larsen, H.E., Munch, B.: Practical Application Of Knowledge On The Survival Of Pathogenic And Indicator Bacteria In Aerated And Non-Aerated Slurry. In: Hygienic Problems of Animal Manures. Proceedings of a joint workshop of expert groups of the Commission of the European Communities, German Veterinary Medical Society (DVG) and Food and Agricultural Organization (D. Strauch, ed.) Stuttgart 1983.

- Lee, W.H., Riemann, H.: The inhibition and destruction of Enterobacteriaceae of pathogenic and public health significance. In: Inhibition and destruction of the microbial cell (W.B. Hugo, ed.), Academic Press, Inc., New York 1971.
- Lund, E.: Inactivation of viruses under anaerobic or aerobic stabilization in liquid manure and in sludges from sewage treatment plants. In: Hygienic Problems of Animal Manures. Proceedings of a joint workshop of expert groups of the Commission of the European Communities, German Veterinary Medical Society (DVG) and Food and Agricultural Organization (D. Strauch, ed.) Stuttgart 1983.
- Mackie, R.I., Bryant, M.P.: Metabolic activity of fatty acid-oxidizing bacteria and the contribution of acetate, propionate, butyrate, and CO_2 to methanogenesis in cattle waste at 40 and 60°C. Appl. Environ. Microbiol. 41, 1363 - 1373 (1981).
- Malina, J.F.: The effect of temperature on high rate digestion of activated sludge. In: Proceedings 16 th Ind. Waste Conf., Purdue University Lafayette, Ind. 1961.
- Maly, J., Fadrus, H.: Influence of Temperature on Anaerobic Digestion. J. WPCF 43, 641 - 650 (1971).
- McCarty, P.L., McKinney, R.E.: Salt Toxicity in Anaerobic Digestion. J. WPCF. 33, 399 - 407 (1961)

Munch, B., Schlundt, J.: Reduction of various pathogens in slurry and sewage sludge subjected to chemical disinfection or to anaerobic digestion at mesophilic or thermophilic temperature. In: Hygienic Problems of Animal Manures. Proceedings of a joint workshop of expert groups of the Commission of the European Communities, German Veterinary Medical Society (DVG) and Food and Agricultural Organization (D. Strauch, ed.), Stuttgart 1983.

Müller, W.: Betriebsergebnisse der Kläranlage Nürnberg-Nord. Ges. Ing. 11, 152 - 160 (1936).

Pfeffer, J.T.: Temperature effects on anaerobic fermentation of domestic refuse. Biotechn. and Bioeng. 16, 771 - 787 (1974).

Plym-Forsshell, L.: Survival of Salmonellae and Ascaris suum eggs in a thermophilic methane gas producing unit. In: Hygienic problems of Animal Manures. Proceedings of a joint workshop of expert groups of the Commission of the European Communities, German Veterinary Medical Society (DVG) and Food and Agricultural Organization (D. Strauch, ed.), Stuttgart 1983.

Popova, N.M., Bolotina, O.T.: The present state of purification of town sewage and the trend in research work in the city of Moscow. In: Advances in Water Pollution Research (E.E. Eckenfelder, ed.), Academic Press, New York 1964.

Prüss, M.: Beschleunigung der Zersetzung in Schlammfäulräumen. Techn. Gemeindeblatt, 70 - 75 (1927).

Roediger, H.: Die anaerobe alkalische Schlammfaulung.
3. Auflage, Verlag R. Oldenbourg München Wien 1967.

Roediger, H.: Bau und Betrieb von Schlammfaulungsanlagen.
In: Stand und Entwicklung der Abwasserreinigung (H. Liebmann, Hsg.), Band 24, Verlag R. Oldenbourg München Wien 1973.

Rudolfs, W., Falk, L., Ragotzkie, R.A.: Literature Review on the Occurrence and Survival of Enteric, Pathogenic and Relative Organisms in Soil, Water, Sewage and Sludges, and on Vegetation. I Bacterial and Virus Diseases. Sew. and Ind. Wastes 22 (1950).

Sierp, F.: Über den Einfluß der Temperatur auf die Zersetzungsvorgänge in den Schlammfaulräumen. Techn. Gemeindeblatt 17/18 (1924).

Sierp, F.: Heizrohre für Schlammfaulräume. Techn. Gemeindeblatt 9, 109 - 113 (1931).

Shelev, G., Kimchie, S., Marchaim, U., Grynberg, H.: Organic loadings and methane production in anaerobic digestion of agricultural wastes. In: Proceedings of the 10th Scientific Conference of the Israel Ecological Society pp E18-E38 (1979).

Soutschek-Bauer, E.: Mikrobiologische Untersuchungen zur thermophilen Methengärung. Diplomarbeit, Universität München (1982).

Stuhlmann F.: Studien zum Verhalten stickstoffhaltiger Wasserinhaltsstoffe bei Langsamfiltration. Veröffentlichung des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft der TU Hannover 37, (1972).

Steiner, A.: Anaerober Abbau von Schlachthofabfällen.
In: Anaerobe Abwasser- und Schlammbehandlung - Biogas-technologie (Bayerische Landesanstalt für Wasserforschung, Hög), R. Oldenbourg Verlag München Wien 1983.

Stafford, D.A., Hawkes, D.L., Horton, R.: In: Methane production from waste organic matter, CRC Press Inc. Boca Raton, Florida, 211 - 213, 1980.

Umbreit, W.W., Burris, R.H., Stauffer, J.F.: Manometric Biochemical Techniques. Fifth Edition, Burgess Publishing Company Minneapolis, USA 1972

van Velsen, A.F.M., Lettinga, G.: Effect of feed composition on digester performance. In: Proceedings of the First International Symposium On Anaerobic Digestion, University College, Cardiff 1979.

Varel, V.H., Isaacson, H.R., Bryant, M.P.: Thermophilic methane production from cattle waste. Appl. Environ. Microbiol. 33, 298 - 307 (1977).

Ward, R.L., Ashley, C.S.: Discovery of an Agent in Wastewater Sludge that reduces the Heat required to inactivate Reovirus. Appl. Environ. Microbiol. 34, 681 - 687 (1977).

Ward, R.L., Ashley, C.S.: Inactivation of Enteric Viruses in Wastewater Sludge through dewatering by Evaporation. Appl. Environ. Microbiol. 34, 564 - 570 (1977).

Ward, R.L., Ashley, C. S.: Effects of Wastewater Sludge and its Detergents on the Stability of Rotavirus. Appl. Environ. Microbiol. 39, 1154 - 1158 (1980).

Willinger, H., Thiemann, G.: Survival of some pathogens in liquid manure during biogas production. In: Hygienic Problems of Animal Manures. Proceedings of a joint workshop of expert groups of the Commission of the European Communities, German Veterinary Medical Society (DVG) and Food and Agricultural Organization (D. Strauch, ed.), Stuttgart 1983.

Wolf, P.: Nordmann, W.: Eine Feld-Methode für die Messung des CSB von Abwasser. Korrespondenz Abwasser, 24. Jahrgang, 277 - 278 (1977).

Wolf, P.: Erfahrungen mit der anaeroben Schlammfaulung und Faulgasproduktion auf kommunalen Kläranlagen in Bayern. In: Anaerobe Abwasser- und Schlammbehandlung - Biogastechnologie (Bayerische Landesanstalt für Wasserforschung, Hsg.), R. Oldenbourg Verlag München Wien 1983.

Wolfe, R.S.: Microbial biochemistry of methane. Int. Rev. of Biochem, Microb. Biochem. 21, 267 - 295 (1979).

Yaziz, M.I., Lloyd, B.J.: The Removal of Salmonellas in Conventional Sewage Treatment Processes. J. of Appl. Bacteriology 46, 131 - 142 (1979).

Die vorliegende Arbeit wurde am Lehrstuhl für Allgemeine Botanik der Ludwig-Maximilians-Universität München unter Leitung von Prof. Dr. O. Kandler von 1979 bis 1983 angefertigt.

Herrn Prof. Dr. O. Kandler danke ich für das Interesse an meiner Arbeit und für viele wertvolle Anregungen.

Weiterhin möchte ich Herrn Prof. Dr. J. Winter für die Hilfe beim Aufbau der Versuchseinrichtungen, für die Unterstützung an den Wochenenden zur Aufrechterhaltung des Fermenterbetriebs sowie für viele praktische Hinweise danken.

Mein besonderer Dank gilt Herrn R. Hilpert, Herrn E. Soutschek-Bauer und Herrn A. Steiner für viele hilfreiche und anregende Diskussionen sowie Herrn A. Steiner für die Durchführung einiger Analysen.

Schließlich gilt mein Dank allen kollegialen Mitarbeitern des Botanischen Institutes, insbesondere Frä. A. Korak, Frau M. Reymers und Frau G. Willig für ihre freundliche Unterstützung bei der Durchführung einiger Analysen.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name	Uwe Temper
Geburtsdatum	27. Apr. 1949
Geburtsort	Hegge bei Kempten/Allg.
Eltern	Edith und Alois Temper
Staatsangehörigkeit	deutsch
Familienstand	verheiratet

Schulbildung

1955 - 1960	Volksschule Hegge
1960 - 1964	Oberrealschule in Kempten/Allg.
1964 - 1970	Allgäu-Gymnasium (math. nat. Zweig) in Kempten/Allg.
Juni 1970	Abitur

Wehrpflicht

Juli 1970 - Dez. 1971	Grüntenkaserne in Sonthofen/Allg.
-----------------------	-----------------------------------

Studium

WS 1973/74 - SS 1978	Studium der Biologie und Chemie für das höhere Lehramt an der LM-Universität München
Sept. 1978	Wissenschaftliche Prüfung für das Lehramt an Gymnasien

Promotion

1979 - 1983	Promotion am Lehrstuhl für Allge- meine Botanik der LM-Universität München unter Leitung von Prof. Dr. O. Kandler während dieser Zeit wissenschaft- licher Angestellter
-------------	--

